

VERFAHREN
ZUR
VOLLAUTOMATISCHEN SCHARFEINSTELLUNG
OPTISCHER SYSTEME

INAUGURAL-DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DES DOKTORGRADES
DER NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT
DER JUSTUS LIEBIG-UNIVERSITÄT GIESSEN

vorgelegt von
WILFRIED KUNZ
aus
EIERSHAUSEN / DILLKREIS

Bad Kreuznach
1969



Digitized by the Internet Archive
in 2026

VERFAHREN
ZUR
VOLLAUTOMATISCHEN SCHARFEINSTELLUNG
OPTISCHER SYSTEME

INAUGURAL-DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DES DOKTORGRADES
DER NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT
DER JUSTUS LIEBIG-UNIVERSITÄT GIESSEN

vorgelegt von
WILFRIED KUNZ
aus
EIERSHAUSEN / DILLKREIS

Bad Kreuznach
1969



D 26

Dekan: Prof. Dr. Alfred Schraub

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Georg Franke

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Eugen Saur

Tag der mündlichen Prüfung: 25. November 1969

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Problem und Aufgabenstellung	1
2. Stand der Technik	2
3. Allgemeine Grundlagen	3
3.1. Strahlungsgesetze	3
3.2. Empfindlichkeit photoelektrischer Wandler	5
3.3. Rauschen	8
3.4. Das optische System als Übertrager	9
3.5. Bildgütekriterien	11
4. Grundlagen des Verfahrens	13
4.1. Einstellkriterium	13
4.2. Meßverfahren	17
4.3. Grenzen des Verfahrens	24
5. Entwurf und Aufbau des Regelkreises	24
5.1. Regelstrecke	24
5.1.1. Gerätebild und Blockschaltbild	24
5.1.2. Beschreibung der Einzelgruppen	27
5.1.2.1. Objektiv	27
5.1.2.2. Strahlenteiler	29
5.1.2.3. Faseroptischer Querschnittswandler	29
5.1.2.4. Photoelektrische Wandler	32
5.1.2.5. Vorverstärker	35
5.1.2.6. Differenzverstärkerstufe	36
5.1.2.7. Torschaltung	39
5.1.2.8. RC-Glied	42
5.2. Regler	42
5.2.1. Blockschaltbild	42
5.2.2. Beschreibung der Einzelgruppen	43

5.2.2.1.	Vergleicher und Kraftverstärker	43
5.2.2.2.	Stellglied	44
5.3.	Regelkreis	44
5.3.1.	Differentialgleichung des Regelkreises	45
5.3.2.	Bestimmung der Beiwerte	46
5.3.3.	Stabilität	47
5.4.	Spannungsversorgung	48
5.5.	Technische Ausführung	48
5.6.	Justierung und Funktionsprüfung	49
6.	Technologische Weiterentwicklung	53
7.	Zusammenfassung	53
8.	Literaturverzeichnis	54

Verfahren zur vollautomatischen Scharfeinstellung optischer Systeme

1

Von W. Kunz, Bad Kreuznach

(Mit 38 Abbildungen und 5 Tabellen)

1. PROBLEM UND AUFGABENSTELLUNG

Zur Kennzeichnung des Problems ist eine genaue Definition der Begriffe „Scharfeinstellung“ und „vollautomatisch“ erforderlich.

Scharfeinstellung bedeutet das Einstellen eines optischen Systems auf die beste Einstellebene durch direkte Messung einer für die Bildqualität charakteristischen Größe, im Gegensatz zum indirekten Verfahren der Entfernungsmessung.

Vollautomatische Scharfeinstellung ist die stetige Nachregelung auf die beste Einstellebene bei Änderung der Gegenstandsweite, unabhängig von Bewegungen des Objektes in der Gegenstandsebene bzw. von Leuchtdichteschwankungen.

Ausgehend von einem Verfahren zur automatischen Scharfeinstellung, das vom Haus SCHNEIDER als Patent [1] angemeldet worden ist, und dessen Hauptanspruch den folgenden Wortlaut hat:

Verfahren zur automatischen Scharfeinstellung optischer Systeme durch Kontrastmessung und Umwandlung der gemessenen Werte in elektrische Energie, dadurch gekennzeichnet, daß der Kontrast zweier unmittelbar benachbarter Bildpunkte der Bildebene gemessen wird, in deren Bereich bei Defokussierung in eindeutiger Weise eine Kontrastminderung auftritt,

soll in dieser Arbeit ein Verfahren zur vollautomatischen Scharfeinstellung beschrieben und ein Modell nach diesem Prinzip gebaut werden.

Der Stand der Technik wird in Kap. 2 aufgezeigt.

Kap. 3 bringt die allgemeinen theoretischen Grundlagen. Nach einer Zusammenstellung strahlungsphysikalischer bzw. lichttechnischer Größen und der zur Empfindlichkeitsberechnung notwendigen Gleichungen (3.1.), wird zur Kennzeichnung der Empfindlichkeit photoelektrischer Wandler eine dem Maximalwert K_m des photometrischen Strahlungsäquivalents entsprechende Größe S_m eingeführt (3.2.).

Im Abschnitt 3.3. werden dann die wichtigsten Gleichungen für das Rauschen von Halbleitern kurz erläutert.

2 Unter Berücksichtigung der optischen Übertragungstheorie (3. 4.) und verschiedener Bildgütekriterien (3. 5.) werden in Kap. 4 Einstellkriterium und Meßverfahren für eine vollautomatische Scharfeinstellung beschrieben.

In Kap. 5 wird der Regelkreis behandelt, wobei in den Abschnitten 5. 1. und 5. 2. Regelstrecke und Regler in ihren Einzelementen untersucht werden.

Zum Abschluß (Kap. 6) werden Hinweise auf Entwicklungsmöglichkeiten unter Einsatz von photoelektrischen Wandlern mit spezieller Anordnung der lichtempfindlichen Flächen diskutiert.

2. STAND DER TECHNIK

Bei der optischen Abbildung ist die Bildweite eine Funktion der Gegenstandsweite. Zur Einstellung eines optischen Systems genügt daher prinzipiell die Messung der Objektentfernung.

Zur indirekten Scharfeinstellung dienen Basis- und Peilentfernungsmesser.

Eine ausführliche Darstellung der verschiedenen konventionellen Entfernungsmesser gibt HODAM [2].

Bei der Peilentfernungsmessung sind die Verfahren von REICHEL [3], HILDEBRAND [4] und der Firma PAILLARD [5] zu erwähnen.

Die direkte Scharfeinstellung ist nur bei Beobachtung des Bildes oder bei Messung einer für die Bildqualität charakteristischen physikalischen Größe wie Beleuchtungsstärke oder Kontrast möglich.

Bei der Scharfeinstellung durch Beobachtung eines Mattscheibenbildes wird die Einstellgenauigkeit durch zusätzliche Hilfsmittel wie Schnittbildentfernungsmesser und Meßraster erhöht. In der Praxis kommen alle Kombinationen zwischen Schnittbildentfernungsmesser, Meßraster und Mattscheibe vor.

DURST und OBERRAUCH [6] und SHULJMAN [7] benutzen als Einstellkriterium die Beleuchtungsstärke im Bildraum, wobei SHULJMAN durch Zwischenschaltung eines Zusatzobjektivs eine gleichmäßige Ausleuchtung der Austrittspupille des Gesamtsystems erzeugt.

Die Messung des maximalen Kontrastes wird durch nichtlineare photoelektrische [8] bzw. photolumineszierende [9] Elemente oder durch Bewegung von Rasterscheiben [10], Faserbündeln [11] oder Spaltblenden [12] vorgenommen. Die Modulation des Ausgangssignals nimmt ein Maximum an, wenn die Bildebene mit der Abtastebene zusammenfällt. Beim letztgenannten Verfahren [12] wird eine Frequenzanalyse des Ausgangssignals vorgenommen und der Maximalwert der Frequenzanteile in einem bestimmten Frequenzband bestimmt. Die Verfahren nach [10] und [11] können grundsätzlich zur vollautomatischen Scharfeinstellung benutzt werden. Ihre Anwendung ist aber auf langsam bewegte Objekte begrenzt.

Die Koinzidenz der Teilbilder bei der Basisentfernungsmessung kann durch photoelektrische Wandler mit gleicher lichtempfindlicher Fläche nachgewiesen werden [13], [14].

3. ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

3.1. Strahlungsgesetze

Die strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen sind mit den Definitionsgleichungen und Einheiten in den Tab.1 und 2 zusammengestellt. Die Bezeichnungen stimmen mit denen im Normblatt DIN 5031 [16] überein.

Tab.1: Zusammenstellung strahlungsphysikalischer Größen

Bezeichnung	Abkürzung	Definitionsgleichung	Einheit
Strahlungsfluß	Φ_e		Watt (W)
Strahlungsstärke	I_e	$I_e = d\Phi_e / d\omega_1$	Wsr^{-1}
Spezifische Ausstrahlung	M_e	$M_e = d\Phi_e / dA_1$	Wm^{-2}
Strahlungsdichte	L_e	$L_e = d^2\Phi_e / (\cos \varepsilon \cdot dA \cdot d\omega)$	$Win^{-2}sr^{-1}$
Bestrahlungsstärke	E_e	$E_e = d\Phi_e / dA_2$	Wm^{-2}

(Raumwinkeleinheit: Steradian (sr))

Tab.2: Zusammenstellung lichttechnischer Größen

Bezeichnung	Abkürzung	Definitionsgleichung	Einheit
Lichtstrom	Φ	$\Phi = K_m \int \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$	Lumen (lm)
Lichtstärke	I	$I = d\Phi / d\omega_1$	Candela (cd)
Spezifische Lichtausstrahlung	M	$M = d\Phi / dA_1$	$lm \cdot m^{-2}$
Leuchtdichte	L	$L = d^2\Phi / (\cos \varepsilon \cdot dA \cdot d\omega)$	$lm \cdot m^{-2} sr^{-1}$
Beleuchtungsstärke	E	$E = d\Phi / dA_2$	$lm \cdot m^{-2}$ = 1 Lux (lx)

- 4 Die Strahlungsgesetze von Planck, Stefan-Boltzmann, Rayleigh-Jeans und das sog. Wien'sche Verschiebungsgesetz sind allgemein bekannt [17].

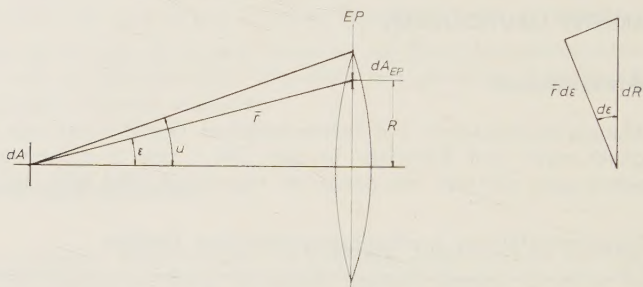


Abb. 1 Anwendung des photometrischen Grundgesetzes auf die optische Abbildung

Die Anwendung des photometrischen Grundgesetzes auf die optische Abbildung nach Abb.1 liefert für den differentiellen Lichtstrom $d^2\Phi$ durch ein Flächenelement dA_{EP} der Eintrittspupille:

$$d^2\Phi = L \cdot dA \cdot \cos^2\epsilon \cdot dA_{EP} / r^2$$

Mit

$$dA_{EP} = 2\pi r^2 \sin\epsilon \cdot d\epsilon / \cos\epsilon$$

folgt nach Integration über ϵ bei $L = \text{const.}$ (Lambertstrahler) für den Gesamtlichtstrom $d\Phi$:

$$d\Phi = L \cdot dA \cdot 2\pi \cdot 1/2 \cdot \sin^2\epsilon \Big|_0^u = \pi \cdot L \cdot dA \cdot \sin^2u \quad (1)$$

Der Gesamtlichtstrom durch die Eintrittspupille ist also proportional zum Quadrat der objektseitigen Apertur.

Bei verlustfreier Abbildung und Gültigkeit der Gaußschen Optik geht der gesamte durch die Eintrittspupille eintretende Lichtstrom durch das Bild dA' des Flächenelementes dA . Es ist also:

$$d\Phi = d\Phi'$$

Die Beleuchtungsstärke E_o' in der Bildmitte ist durch

$$E_o' = d\Phi' / dA' \quad (2)$$

gegeben. Wegen

$$dA / dA' = 1 / \beta'^2 \quad \text{und} \quad \beta' = \sin u / \sin u'$$

folgt:

$$E_o' = \pi \cdot L \cdot \sin^2u' \quad (3)$$

d. h. die Beleuchtungsstärke in der Bildmitte ist proportional zum Quadrat der bildseitigen Apertur.

Im Bildraum gilt analog zu Gleichung (1):

$$d\Phi' = \pi \cdot L' \cdot dA' \cdot \sin^2 u'$$

Mit den Gleichungen (2) und (3) folgt:

$$L' = L$$

d. h. bei verlustfreier Abbildung ist die Bildleuchtdichte L' gleich der Objektleuchtdichte L .

Zwischen der Leuchtdichte L einer diffus reflektierenden Fläche und der von der auffallenden Strahlung erzeugten Beleuchtungsstärke E besteht folgender Zusammenhang:

$$\pi \cdot L = \varrho \cdot E$$

wobei ϱ der Remissionsgrad ist. Wird die Beleuchtungsstärke E in Lux angegeben, so folgt die Leuchtdichte L in $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} = 10^{-4}$ Stilb (sb).

3. 2. Empfindlichkeit photoelektrischer Wandler

Eine Strahlung beliebiger spektraler Zusammensetzung als Eingangsgröße X ruft an einem Empfänger eine bestimmte Ausgangsgröße Y hervor. Das Verhältnis von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße ist die absolute Empfindlichkeit S des Empfängers:

$$S = Y / X$$

Die differentielle Empfindlichkeit s_{d1} (Kennlinie) ist definiert durch die Gleichung:

$$s_{d1} = dY / dX$$

Die spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ folgt aus der Beziehung:

$$s(\lambda) = dY(\lambda) / dX(\lambda)$$

Die absolute Empfindlichkeit photoelektrischer Wandler wird angegeben durch den Photostrom I , bezogen auf die von einer einfallenden Strahlung erzeugte Bestrahlungsstärke bzw. Beleuchtungsstärke. Da diese Angaben meist für verschiedene Strahlertemperaturen gemacht werden, ist ein direkter Vergleich der angegebenen Werte nicht möglich.

Strahlungsempfindlichkeit S_e und Lichtempfindlichkeit S zeigen eine unterschiedliche Abhängigkeit von der Strahlertemperatur.

In diesem Abschnitt sollen die Beziehungen zwischen diesen beiden Größen angegeben und eine Größe S_{in} eingeführt werden, die nur für die Empfänger-eigenschaften charakteristisch ist.

Die Strahlungsempfindlichkeit S_e ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$I = S_e \cdot E_e \quad \text{mit} \quad E_e = \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

- 6 Analog zur Augenempfindlichkeitskurve kann für jeden photoelektrischen Empfänger eine Empfindlichkeitskurve angegeben und durch den Absolutwert S_m im Maximum charakterisiert werden:

$$I = S_m \cdot E'_e \text{ mit } E'_e = \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda) / S_m \cdot d\lambda \quad (5)$$

$s(\lambda) / S_m = s_{rel}(\lambda)$ ist die relative spektrale Empfindlichkeit des entsprechenden photoelektrischen Wandler.

Für den Zusammenhang zwischen Strahlungsempfindlichkeit S_e und Maximalwert S_m gilt nach den Gleichungen (4) und (5):

$$S_m = S_e \cdot E_e / E'_e = S_e \int E_{e\lambda}(\lambda) d\lambda / \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

In den Datenblättern ist meist die Strahlungsempfindlichkeit für einen speziellen Strahler bei einer bestimmten Temperatur angegeben. Zur Ermittlung von S_m muß nach Gleichung (6) einmal die Gesamtbestrahlungsstärke E_e und die mit der relativen spektralen Empfindlichkeit des Empfängers bewertete Bestrahlungsstärke E'_e bestimmt werden.

$E_{e\lambda}(\lambda)$ ist bis auf einen von der Geometrie der Anordnung bestimmten Faktor gleich der aus dem Planckschen Strahlungsgesetz zu ermittelnden spektralen Strahlungsdichte $L_{e\lambda}(\lambda)$. Bei der Quotientenbildung fällt dieser Faktor heraus, so daß für die Bestimmung von S_m die relativen spektralen Strahlungsdichtekurven ausreichen.

Bei vorgegebener spektraler Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}(\lambda)$ ist die Gesamtbeleuchtungsstärke durch folgende Gleichung gegeben:

$$E = K_m \cdot \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Dabei ist $V(\lambda)$ die relative spektrale Empfindlichkeit des Normalauges und K_m der Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents mit

$$K_m = 680 \text{ lm/W}$$

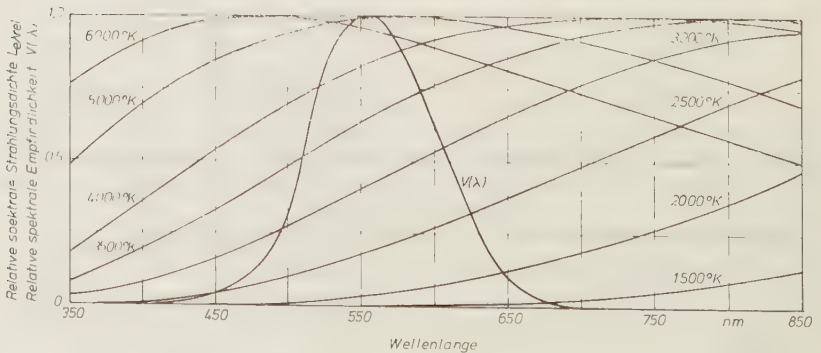


Abb. 2 Relative Strahlungsdichte $L_{e\lambda rel}(\lambda)$ des Schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen und relative spektrale Empfindlichkeit $V(\lambda)$ des Normalauges in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In Abb. 2 ist die relative spektrale Strahlungsdichte $L_{\lambda \text{rel}}(\lambda)$ für einen Schwarzen Strahler bei verschiedenen Temperaturen und die relative spektrale Empfindlichkeit $V(\lambda)$ des Normalauges in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt.

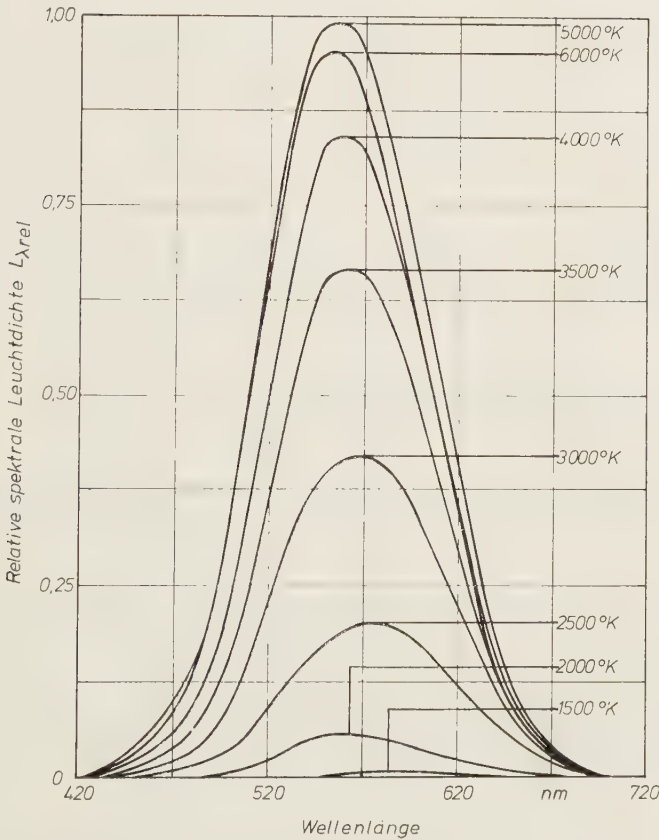


Abb. 3 Relative spektrale Leuchtdichte $L_{\lambda \text{rel}}(\lambda)$ für den Schwarzen Strahler bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Abb. 3 zeigt den Verlauf der relativen spektralen Leuchtdichtekurven $L_{\lambda \text{rel}}(\lambda)$ mit der Strahlertemperatur als Parameter.

Die Lichtempfindlichkeit S ist durch die Gleichung

$$I = S \cdot E$$

definiert, wobei E die durch Gleichung (7) bestimmte Gesamtbeleuchtungsstärke ist. Mit Gleichung (4) folgt:

$$S = S_0 \cdot E_0 / E \quad (8)$$

Das Verhältnis $\eta = E/E_0$ ist die sog. Lichtausbeute. Sie ist eine für jeden Strahler bei fester Temperatur charakteristische Größe. Die Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abb. 4 für den Schwarzen Strahler und für einen Wolframstrahler dargestellt. Die Werte für die Lichtausbeute des Wolfram-

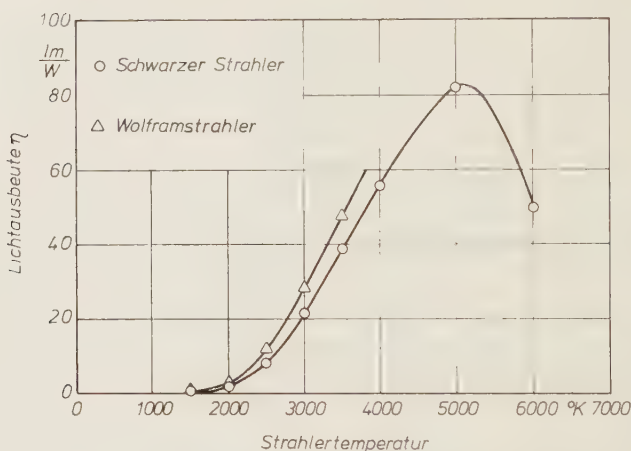


Abb. 4 Lichtausbeute η für den Schwarzen Strahler und einen Wolframstrahler in Abhängigkeit von der Temperatur

strahlers sind unter Berücksichtigung des Emissionsvermögens im sichtbaren Bereich bzw. des Gesamtemissionsvermögens berechnet worden. Die Zahlenwerte sind dem Handbuch der Physik [18] entnommen.

Für den Zusammenhang zwischen dem Äquivalentwert S_m eines photoelektrischen Empfängers und der Lichtempfindlichkeit S folgt aus den Gleichungen (6) und (8):

$$S_m = \frac{S_0 \cdot E_0 / E_0'}{S \cdot K_m \cdot \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda / \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda} = \frac{S \cdot \eta \cdot E_0 / E_0'}{S \cdot E / E_0'} \quad (9)$$

Die hier definierte Größe S_m ist unabhängig von der Strahlertemperatur und den Eigenschaften des Strahlers. Sie hängt nur von den Eigenschaften des Empfängers ab.

3.3. Rauschen

Der Strom in einem Festkörper ist durch die Konzentration n und die Geschwindigkeit v der Ladungsträger bestimmt:

$$i = e_0 \cdot n \cdot v$$

Bei Metallen ist n konstant. Ohne äußeres Feld ist der mittlere Strom i gleich

Null. Nach NYQUIST [19] gilt für das mittlere Schwankungsquadrat des Stromes die Bezeichnung:

9

$$(\delta i_v)^2 = 4kT \Delta v / R \quad (10)$$

Dabei ist R der Widerstand des Materials und Δv das betrachtete Frequenzband. Diese Formel erhielt Nyquist durch Anwendung des Gleichverteilungssatzes auf einen Schwingkreis schwacher Dämpfung.

Die quantenmechanische Berechnung liefert [20]:

$$(\delta i_v)^2 = \int_{v_1}^{v_2} 4kT / R (v) \cdot hv / kT \cdot 1 / (\exp (hv / kT) - 1) \cdot dv$$

In Halbleitern ist n veränderlich. Jeder Ladungsträger verursacht während der Dauer seines Aufenthaltes im Leitungsband einen Stromstoß. Unter Berücksichtigung der Trägerstatistik im Halbleiterkristall und einer statistischen Verteilung der Lebensdauer τ gilt [21]:

$$(\delta i_n)^2 = 4e_0 b F \tau_0 \Delta v / R (1 + 4\pi \tau_0^2 v^2)$$

Dabei ist τ_0 die mittlere Lebensdauer, b die Beweglichkeit der Ladungsträger und F die anliegende Feldstärke.

Wird die Driftstrecke der Ladungsträger größer als die Probenlänge (bzw. Übergangszone), d. h. die Lebensdauer größer als die Driftzeit, dann gilt die sog. Schottky-Beziehung des Schroteffektes:

$$(\delta i_s)^2 = 2e_0 i \Delta v \quad (11)$$

Bei Dioden und Transistoren gilt diese Gleichung für niedrige und mittlere Frequenzen.

Bei den verschiedensten Leitungsmechanismen tritt ein sog. Modulationsrauschen oder $1/f$ -Rauschen auf, bei dem Oberflächeneffekte eine Rolle spielen [22]. Das Modulationsrauschen nimmt mit dem Quadrat der Feldstärke zu und mit $f^{-\alpha}$ ab, wobei $\alpha \approx 1$ ist.

Neben thermischem Rauschen, Schrotrauschen und Modulationsrauschen tritt bei Siliziumbauelementen das sog. Rekombinations- und Paarerzeugungsrauschen auf. Es gilt näherungsweise [23]:

$$(\delta i_R)^2 = 4kT \cdot \operatorname{Re} (di_{0,R} / du_0) \Delta v - e_0 i_{0,R} \cdot \Delta v$$

wobei $i_{0,R}$ der Rekombinationsstrom ist.

3. 4. Das optische System als Übertrager

Die Übertragungstheorie — ein Teilgebiet der Informationstheorie — kann auch auf die Eigenschaften eines optischen Systems angewendet werden.

Dabei müssen zwei Bedingungen erfüllt sein, nämlich Linearität und Iso-planasie.

Die Beleuchtungsstärkeverteilung in der Bildebene kann durch das Faltungsintegral aus Leuchtdichteverteilung und Punktbildfunktion dargestellt werden. Die zweidimensionale optische Übertragungsfunktion ist definiert als das Verhältnis der Fourier-Transformierten der Intensitätsverteilung in Bild- und Gegenstandsebene. Sie ist gleichzeitig die Fourier-Transformierte der Punktbildfunktion.

Die Erregung in einem Bildpunkt ist die Fourier-Transformierte der sog. Pupillenfunktion. Daher kann die Übertragungsfunktion durch die Pupillenfunktion dargestellt werden. Sie ist im wesentlichen durch das Überlappungsgebiet zweier Einheitskreise bestimmt. Der Abstand der Mittelpunkte ist von der Ortsfrequenz in der jeweiligen Koordinatenrichtung abhängig. Durch Drehung des Koordinatensystems entsteht eine eindimensionale Funktion, die noch vom Drehwinkel als Parameter abhängig ist. Die Phase der Pupillenfunktion ist durch die sog. Wellenaberration bestimmt, die ihrerseits von den Konstruktionsdaten des optischen Systems abhängt [24], [25], [26].

Damit kann die eindimensionale Übertragungsfunktion als Fourier-Transformierte des Linienbildes dargestellt werden. Die Kantenbildfunktion kann durch Integration der Linienbildfunktion gewonnen werden.

Aus dem „spot-diagram“ nach HERZBERGER [27] kann der Übertragungsfaktor in geometrisch-optischer Näherung errechnet werden.

Aus den Zusammenhängen zwischen Übertragungsfunktion, Linienbildfunktion, Kantenbildfunktion und dem Kontrastverhältnis bei der Abbildung von Sinus- oder Streifengittern folgen verschiedene Methoden zur Messung der Übertragungsfunktion:

1. Messung des Linienbildes und Fourier-Transformation
2. Bildung des Verhältnisses der Fourier-Transformierten von Bild- und Objektintensität bei einfachen Objekten
3. Überlagerung von zwei Wellenfronten mittels eines Interferometers und Ausblendung eines dem Überlappungsgebiet der verschobenen Pupillenfunktionen entsprechenden Bereiches
4. Messung des Kontrastes im Bild eines Sinus- oder Streifengitters durch Abtastung mit einem Spalt. Statt des Spaltes kann auch das Objekt bewegt werden. Außerdem ist eine Umkehrung des Strahlenganges möglich.

Die Messungen zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen, Linienbild- und Kantenbildfunktionen des beim Versuchsaufbau verwendeten Objektivs sind an einem von der Firma Leitz entwickelten Gerät [28] durchgeführt worden. Der Prüfling bildet einen Spalt von 5 μm Breite auf die Kante eines Dreikantprismas ab. Spaltbild und Kante stehen senkrecht aufeinander. Die Kante des Prismas ist abgeschliffen, so daß ein etwa 0,1 mm breiter sogenannter Auswahlspalt entsteht. Dieser wird über ein Abbé-König-Prisma und ein Wendepisma auf den mit Gitterstegen versehenen Mantel einer Trommel abgebildet. Die Gitterstege sind parallel zur Trommelachse. Die Trommel

rotiert mit konstanter Geschwindigkeit. Mittels eines Synchronmotors wird das Abbé-König-Prisma und damit das Bild des Auswahlspaltes relativ zu den Gitterstegen gedreht. Die wirksame Linienfrequenz ist durch die Gleichung $N = N_0 \cdot \sin \alpha$ gegeben, wobei die Grundfrequenz $N_0 = 5 \text{ Per/mm}$ ist. Die Gesamtvergrößerung, bezogen auf die Bildebene des Prüflings, ist 36, so daß die Ortsfrequenz zwischen Null und 180 Per/mm variiert werden kann. Eine zur Drehung α des Prismas proportionale Spannung wird über ein Sinus-Potentiometer auf die x-Achse eines Zweikomponentenschreibers gegeben. Dadurch wird die Skalenteilung linear.

Der Einfluß der endlichen Objektpaltbreite und der Schräglage des Auswahlspaltes relativ zu den Gitterstegen wird durch eine bei vorgegebener Grundfrequenz N_0 und Breite des Auswahlspaltes nur vom Drehwinkel α abhängigen Korrekturfunktion berücksichtigt.

Durch eine Anordnung von elektrischen Filtern wird die Grundfrequenz des Ausgangssignals (30 kHz) ausgefiltert. Der Gleichspannungsanteil dient zur Regelung der Hochspannung am Photomultiplier. Nach Gleichrichtung des Signals wird die y-Achse des Schreibers angesteuert.

Die Linienbildfunktion wird durch Abtastung mittels eines Spaltes ermittelt. Die Bewegung des Spaltes erfolgt über eine archimedische Spirale.

Durch Integration mit Hilfe eines Analogrechners wird die Kantenbildfunktion bestimmt.

Vom Arbeitskreis für die Qualitätsbewertung optischer Systeme im Fachnormenausschuß Feinmechanik und Optik ist eine ausführliche Literatursammlung zur optischen Übertragungsfunktion angelegt worden [29].

3.5. Bildgütekriterien

Die Leistungsfähigkeit eines optischen Systems ist durch die vollständige Übertragungsfunktion gekennzeichnet. Die Qualität einer mittels dieses Systems erzeugten Abbildung unterliegt dem subjektiven Güteurteil des Beobachters. Die verschiedenen Bildgütekriterien sollen einen Zusammenhang zwischen der subjektiven Bildgüteempfindung und objektiv meßbaren Größen herstellen.

Nach SLEVOGT [30] sind bei stärkeren Qualitätseinbußen zur Beurteilung mindestens drei primäre Qualitäten erforderlich: Detailreichtum, Konturenschärfe und Kontrastreichtum. Diesen Begriffen entsprechen beim Vergleich mit dem Objekt: Auflösung, Gradiententreue und Kontrasttreue.

Die einzelnen Bildgütekriterien sind aus verschiedenen objektiv meßbaren Größen abgeleitet.

Auflösungsvermögen und Definitionshelligkeit [31] sind über das Punktbild definiert. HERTEL [32] benutzt anstelle der Definitionshelligkeit die aus der Linienbildfunktion entnommene relative Gipfelhöhe.

Die Totalundeutlichkeit ist das Integral über das Quadrat der Querabweichungen mit der Durchstoßhöhe als Gewichtsfunktion.

- 12 Äquivalentbandbreite [33] und „acutance“ [34] berücksichtigen den Intensitäts- bzw. Schwärzungsverlauf bei Kantenbildern.

Minimalobjekt [35] bzw. Minimallinienbreite [36] und die sog. Objektmengenfläche nach KROEBEL [37] sind mit Hilfe von speziellen Objekten bzw. Testbildern abgeleitet.

Aus den Unterschieden zwischen Objekt- und Bildstruktur gewinnt LINFOOT [38] drei Kriterien: Fidelität M_F , relativer Strukturinhalt M_S und Korrelationsqualität M_K . Zwischen diesen Größen besteht die Beziehung:

$$M_F = 2M_K - M_S$$

HAUSER u. a. [39], BARNSTEDT [40], LUKOSZ [41], HEYNACHER [42] und BIEDERMANN [43] gehen bei der Ableitung der Kriterien von der optischen Übertragungsfunktion aus.

Bei geringfügigen Qualitätsminderungen führen alle Kriterien zum gleichen Ergebnis. Da nach Slevogt bei stärkeren Qualitätseinbußen mindestens drei primäre Qualitäten zur Beurteilung einer Abbildung erforderlich sind (für das Luftbild ohne Streulichteinfluß genügen nach HERTEL [32] zwei Größen), ist der in den verschiedenen Arbeiten abgeleitete Zusammenhang zwischen subjektiver Bildgüteempfindung und jeweiligem Kriterium nur unter gewissen einschränkenden Bedingungen gegeben.

Wegen des Zusammenhangs zwischen Punktbild-, Linienbild-, Kantenbildfunktion und der Übertragungsfunktion können die verschiedenen Kriterien auf letztere zurückgeführt werden.

Das Auflösungsvermögen entspricht der Ortsfrequenz, bei welcher der Bildkontrast gleich der visuellen Kontrastschwelle des Auges ist. Wegen der Kleinheit dieser Schwelle liegt diese Frequenz in einem Bereich, der für die Abbildungsgüte unwesentlich ist [41].

Die Definitionshelligkeit entspricht dem Integral über die zweidimensionale Übertragungsfunktion [44].

Die relative Gipfelhöhe ist gleich der Fläche unter der eindimensionalen Übertragungsfunktion [32].

Die Totalundeutlichkeit ist der Koeffizient des quadratischen Gliedes bei der Entwicklung der Übertragungsfunktion nach Ortsfrequenzen. Dieses Kriterium ist nur bei kleinen Werten des Arguments brauchbar [45].

Die Äquivalentbandbreite entspricht der Fläche unter dem Quadrat der Übertragungsfunktion (Schröffheit bei HERTEL [32]).

Nach KÄMMERER [36] entsprechen Minimalobjekt bzw. Minimallinienbreite der über alle Azimute gemittelten Ortsfrequenz, bei der der Bildkontrast den Wert 0,7 besitzt.

Relativer Strukturinhalt und Korrelationsqualität sind bei einem speziellen Objekt, bestehend aus Sinusgittern unterschiedlicher Frequenz und konstanten Kontrastes, gleich dem Integral über das Quadrat der Übergangsfunktion bzw. über die einfache Funktion [46].

4.1. Einstellkriterium

Ein Einstellkriterium zur Scharfeinstellung muß folgende Bedingungen erfüllen:

1. Einstellen auf die beste Einstellebene
2. Empfindliche Reaktion auf Defokussierung

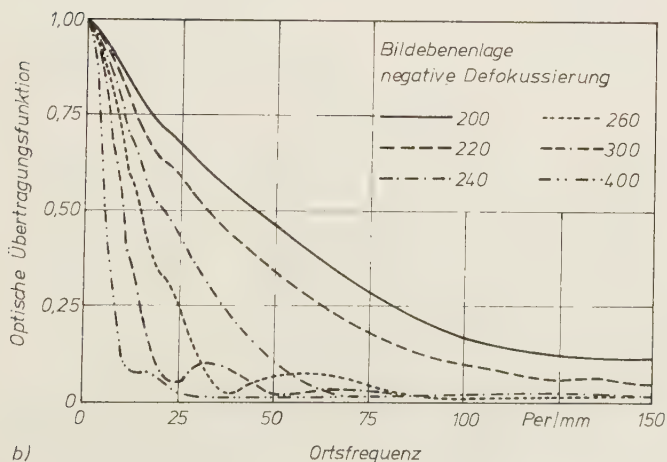
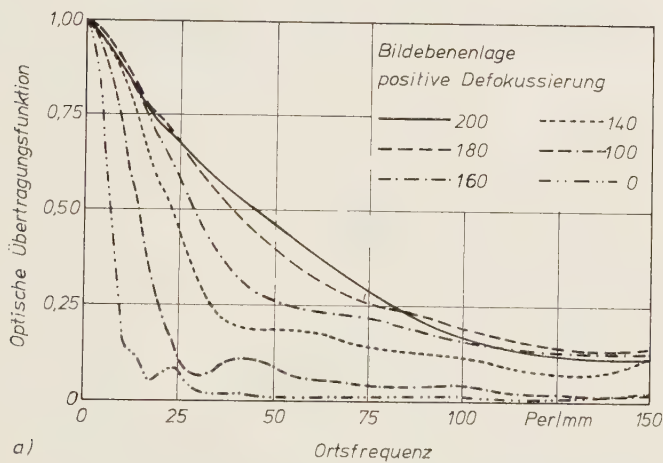


Abb. 5 Optische Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz bei positiver a) und negativer b) Defokussierung
Objektiv: Xenon 1,4/25 Blende: 1,4 Objekt-Abstand: ∞ (Parameter: Lage der Bildebene relativ zu einem beliebigen Bezugspunkt in μm)

- 14 Bei kleinen Qualitätsminderungen der optischen Abbildung kann die Beurteilung des Bildes nach einem Kriterium erfolgen. Die beste Einstellebene ist damit durch den Extremwert eines der genannten Kriterien gegeben.

Aus den Queraberrationen kann auf die Leistungsfähigkeit des optischen Systems geschlossen werden. Dabei entspricht der Defokussierung die Addi-

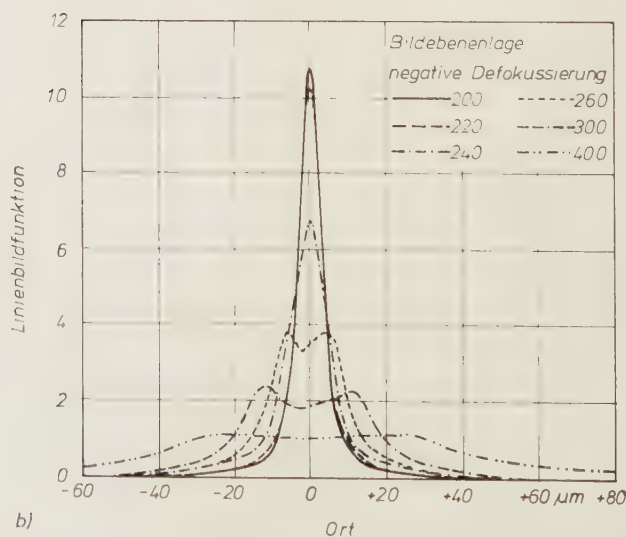
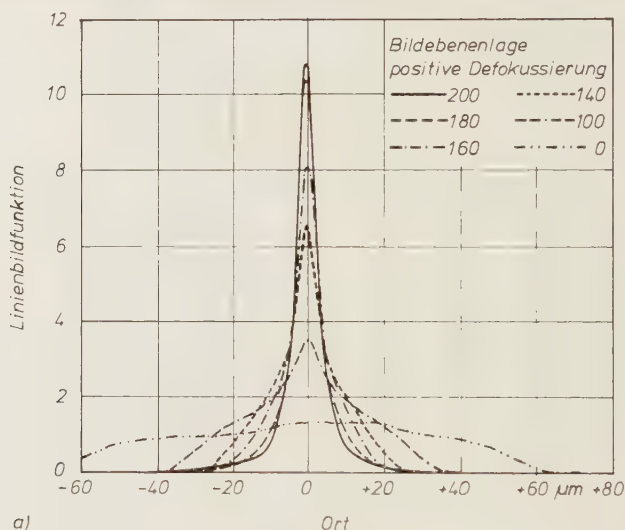


Abb. 6 Linienbildfunktion bei positiver a) und negativer b) Defokussierung (Ordinate: beliebige Einheiten) Objektiv: Xenon 1,4/25 Blende: 1,4 Objektstand: ∞ (Parameter wie in Abb. 5)

tion bzw. Subtraktion einer linearen Funktion zur bzw. von der Aberrationsfunktion. Zwischen der Steigung m der Geraden und der Verschiebung Δs gegenüber der Gaußschen Bildebene gilt die Beziehung:

$$m = \Delta s / f$$

wobei f die Brennweite des optischen Systems ist.

Die beste Einstellebene ist durch die Steigung von Tangenten an die Aberrationskurven mit minimalem Abstand bestimmt. Der Abstand der beiden Tangenten ist ein Maß für den Kerndurchmesser des Punktbildes. In der besten Einstellebene wird der Kerndurchmesser minimal, und die Beleuchtungs-

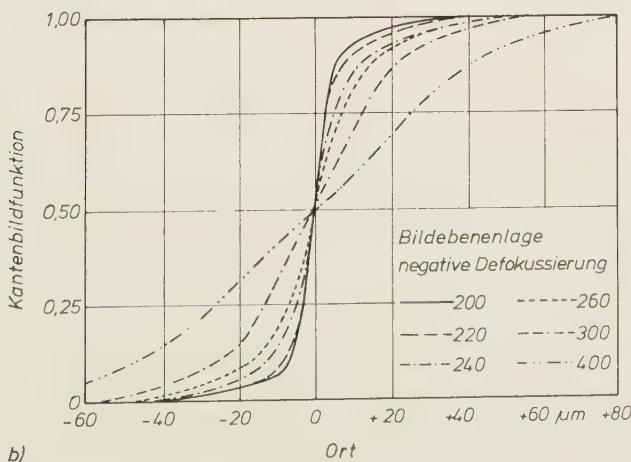
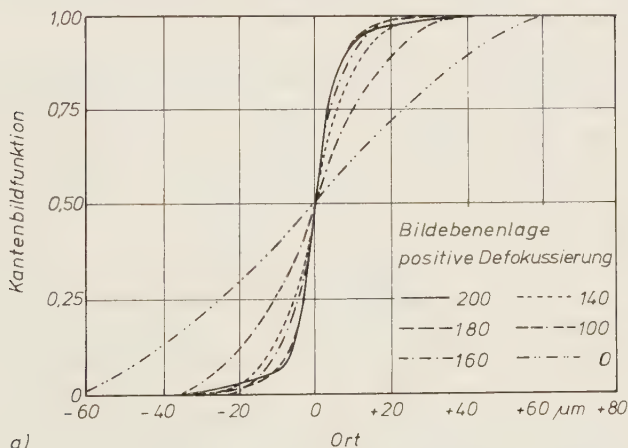


Abb. 7 Kantenbildfunktion (normiert) bei positiver a) und negativer b) Defokussierung
Objektiv: Xenon 1,4/25 Blende: 1,4 Objektstand: ∞ (Parameter wie in Abb. 5)

16 stärke im Kern nimmt ein Maximum an [45]. Für das Linienbild gilt qualitativ dasselbe. Da die Übertragungsfunktion die Fourier-Transformierte des Linienbildes ist, entspricht einem schmalen Linienbild eine breite Übertragungsfunktion.

Als Kriterium zur Scharfeinstellung erscheint die maximale Kantenbildteilheit geeignet. Wegen des Zusammenhangs zwischen Linien- und Kantenbild ist die beste Einstellebene durch den Extremwert des Linienbildmaximums gekennzeichnet.

Bei normalen Objekten sind Linienstrukturen selten. Dagegen treten Kanten, d. h. Übergänge zwischen Bereichen unterschiedlicher Leuchtdichte häufig auf. Die Bestimmung des Gradienten eines Kantenbildes macht eine Differentiation erforderlich.

Mit dem oben beschriebenen Gerät (3.4.) sind Messungen der optischen Übertragungsfunktion, der Linienbild- und Kantenbildfunktion an einem Objektiv des Typs Xenon 1,4/25 durchgeführt worden. Die verschiedenen

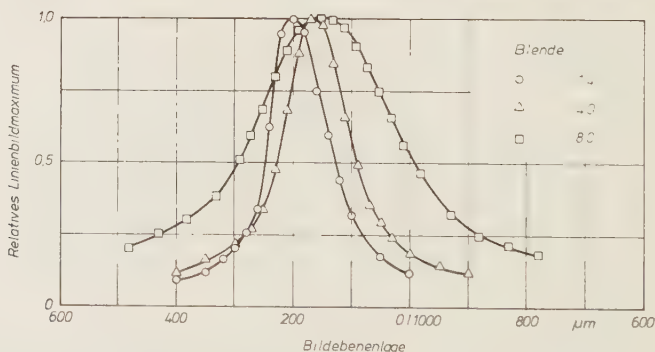


Abb. 8 Relatives Linienbildmaximum in Abhängigkeit von der Bildebenenlage für verschiedene Blendenwerte

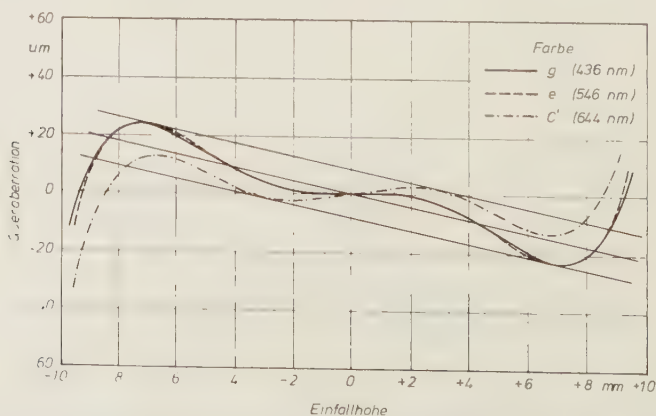


Abb. 9 Queraustrittskurven des Objektivs Xenon 1,4/25 für die Bildmitte und die Farben g, e und C'

Kurven bei positiver und negativer Defokussierung beim Blendenwert 1,4 sind in den Abb. 5, 6 und 7 dargestellt. Die Parameterwerte kennzeichnen die Lage der Bildebene von einem willkürlichen Bezugspunkt in μm . Die optimale Einstellung ist durch den Maximalwert der Übertragungsfunktion bei einer Ortsfrequenz von 40 Per/mm bestimmt.

Abb. 8 zeigt die Abhängigkeit des relativen Linienbildmaximums von der Defokussierung. Die Differenz der zu den Ordinatenwerten 1 gehörigen Abszissenwerte ist die sogenannte Blendendifferenz. Diese beträgt nach Abb. 8 für die Blendenwerte 1,4 und 8 etwa $50\mu\text{m}$ und stimmt mit dem aus den Aberrationskurven in Abb. 9 ermittelten Wert überein.

4 2. Meßverfahren

Als Einstellungskriterium wird die maximale Kantensteilheit gewählt. An ein Verfahren zur Messung dieser Größe werden folgende Anforderungen gestellt:

1. Hinreichende Genauigkeit
2. Unabhängigkeit von Leuchtdichteschwankungen
3. Eindeutigkeit des Zusammenhangs zwischen Defokussierung und Meßwert.

Die Differentiation kann durch Messung des Differenzlichtstromes durch ein Doppelspaltssystem mit gemeinsamer Trennungslinie angenähert werden. Die Qualität der Differentiation hängt von der Breite der Spalte ab.

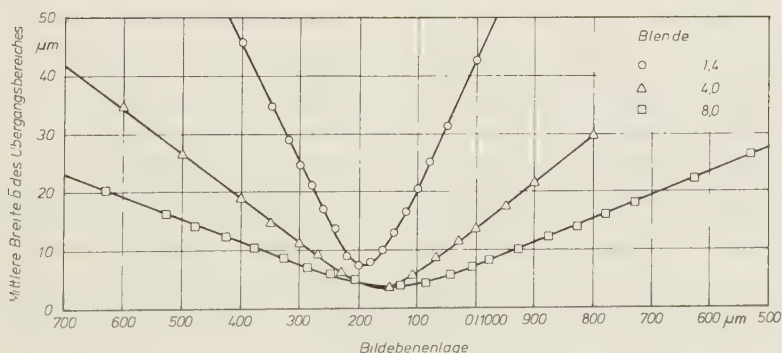


Abb. 10 Mittlere Breite $\bar{b}$ des Übergangsbereiches in Abhängigkeit von der Bildebenenlage bei verschiedenen Blendenwerten ($\bar{b} = [F(0,9) + F(0,1)] / 2$, wobei F die Kantenbildfunktion ist)

18 Wegen der begrenzten Empfindlichkeit der photoelektrischen Wandler ist ein Mindestlichtstrom erforderlich, der die Spaltdimensionen nach unten begrenzt.

Die Abszissenwertdifferenz der 0,9- und 0,1-Ordinatenwerte der Kantenbildkurven bei verschiedenen Blendenwerten (Abb. 10) gibt einen Hinweis auf die Größe des Übergangsbereiches in Abhängigkeit von der Defokussierung.

Der Lichtstrom ist proportional zur Fläche unter der Kantenbildkurve. Für einen Doppelspalt mit gemeinsamer Trennungslinie sind in den Abb. 11 a...c die relativen Differenzlichtströme bei Einzelspaltbreiten von 10, 20, ... 50 μm in Abhängigkeit von der Defokussierung aufgetragen. Die einzelnen Abbildungen gehören bezugsweise zu den Blendenwerten 1,4, 4 und 8. Das Gaußsche Bild der Kante und die Trennungslinie der Spalte fallen zusammen.

Da Übergangsbreite und Spaltbreite in der gleichen Größenordnung liegen, wird nur eine mittlere Steilheit gemessen. Der prozentuale Abfall des Differenzlichtstromes bei Defokussierung wird umso größer, je schmaler der Abtastspalt ist. Der Verlauf bei positiver und negativer Defokussierung ist wegen der Mittelung in einem relativ weiten Bereich symmetrisch zur besten Einstellenebene.

Die Abb. 12a, b veranschaulichen das Differenzsignal bei Abtastung senkrecht zur Kante bei einer Einzelspaltbreite von 20 μm und einem Blendenwert von 1,4 mit der Defokussierung als Parameter. Der Verlauf gleicht qualitativ den gemessenen Linienbildkurven. Die Verbreiterung ist durch die relativ große Spaltbreite bedingt. Die Maximalwerte geben ein relatives Maß für die zu erwartenden Ausgangssignale.

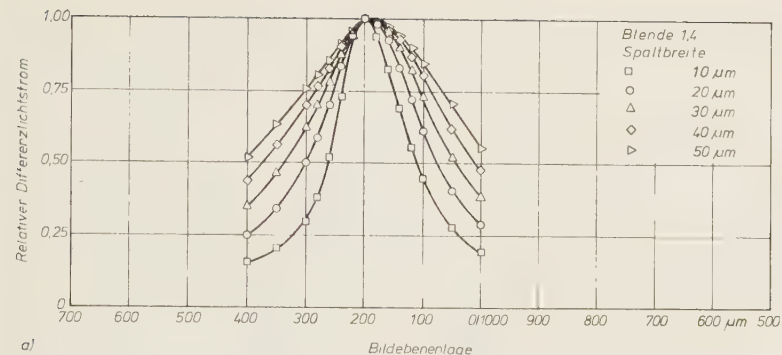
Die zweite Forderung besagt, daß Bewegungen des Objektes in der Gegenstandsebene oder Beleuchtungsschwankungen keinen Einfluß auf das Ausgangssignal haben dürfen.

Zur eindeutigen Festlegung der Defokussierungsrichtung gibt es verschiedene Möglichkeiten:

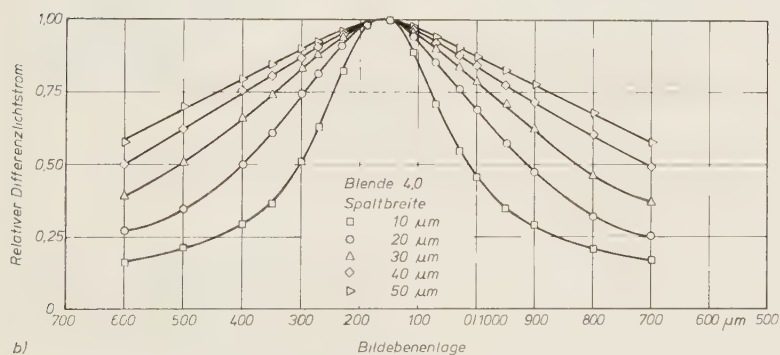
1. Bestimmung des Vorzeichens der Ableitung des Differenzsignals während der Bewegung des Objektes
2. Schwingen des Abtastsystems in Richtung der optischen Achse
3. Abtastung in zwei Ebenen, wobei die Doppelspalte denselben Bildausschnitt erfassen.

Das Vorzeichen der Ableitung hängt außer von der Defokussierung noch von der Bewegung des Objektes in der Gegenstandsebene bzw. von Beleuchtungsschwankungen ab.

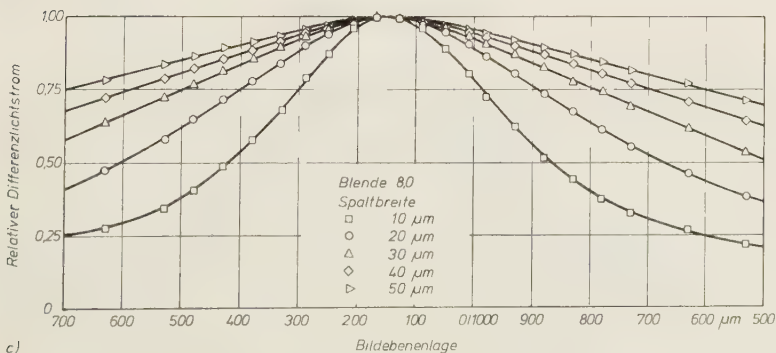
Das zweite Verfahren ist auf langsame Objektbewegungen begrenzt, da durch das Schwingen von mechanischen Teilen eine niedrige Grenzfrequenz festgelegt ist.



a)



b)



c)

Abb. 11 Relative Differenzlichtströme bei Abtastung einer Kante mit einem idealen Doppelspalt bei Einzelspaltbreiten von 10, 20, 30, 40 und 50 μm in Abhängigkeit von der Bildebenenlage für die Blendenwerte 1,4 a), 4,0 b) und 8,0 c)

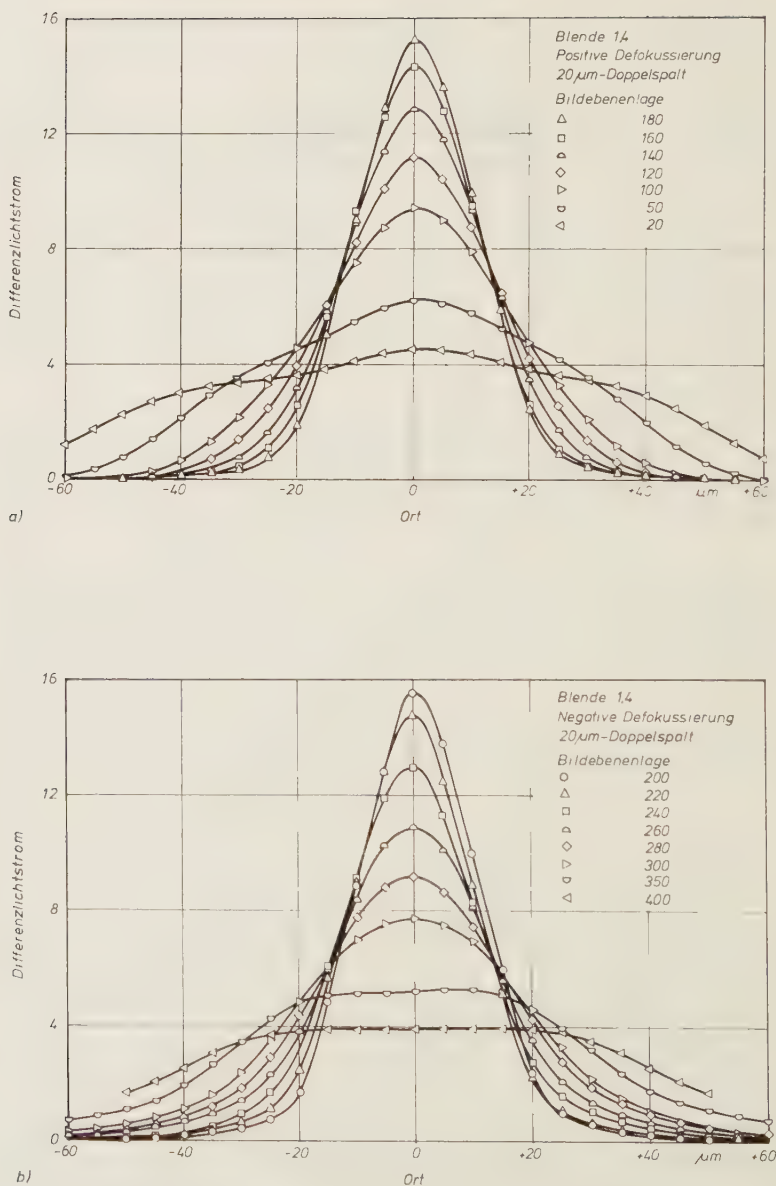


Abb. 12 Differenzlichtstrom (beliebiger Ordinatenmaßstab) bei Abtastung senkrecht zur Kante bei verschiedenen Einstellungen des Abtastsystems im Bereich positiver a) und negativer b) Defokussierung für Blende 1,4
(Parameter: Lage der Bildebene relativ zu einem beliebigen Bezugspunkt in μm)

Die Abtastung in zwei identischen Bildausschnitten in zwei verschiedenen Ebenen hat den Vorteil, daß der Einfluß von Objektbewegungen in der Gegenstandsebene und von Beleuchtungsschwankungen eliminiert wird.

Aus den Messungen am Objektiv des Typs Xenon 1,4/25 und der für verschiedene Spaltbreiten ermittelten Abnahme des Differenzlichtstromes bei Defokussierung muß ein optimales Verhältnis zwischen Spaltbreite und Abstand der Abtastebenen ermittelt werden. Bei kleinster Blendenzahl soll die Bildqualität in den symmetrisch zur Einstellebene angeordneten Abtastebenen noch hinreichend gut sein. Die maximal zulässige Minderung der Bildqualität kann durch einen Mindestwert des Linienbildmaximums festgelegt werden. Bei einem so vorgegebenen Abstand der Abtastebenen muß die Wahl der Einzelspaltbreite so erfolgen, daß bei großen Blendenzahlen noch ein merklicher Abfall des Differenzlichtstromes auftritt.

Bei Verschiebung des Abtastelementes in Richtung der optischen Achse wird in der jeweiligen Abtastebene der Differenzlichtstrom gemessen. Die Differenz zwischen den Meßwerten kann aus zwei um den Betrag des Ebenen-

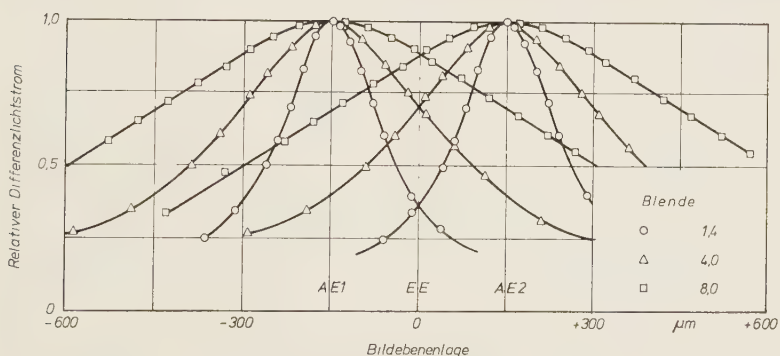


Abb. 13 Relativer Differenzlichtstrom in den Abtastebenen AE1 und AE2 in Abhängigkeit von der Bildebenenlage (EE = Einstellebene)

abstandes verschobenen Differenzlichtstromkurven ermittelt werden, wie dies in Abb. 13 für eine Einzelspaltbreite von $20\ \mu\text{m}$ und einen Ebenenabstand von $300\ \mu\text{m}$ bei verschiedenen Blendenwerten dargestellt ist. Diese Werte sind die aus den Messungen unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit der photoelektrischen Wandler und der Spaltlänge errechneten Optimalwerte.

Die Differenzkurven (Abb. 14) sind ungerade Funktionen der Defokussierung. Sie geben die Differenz der Kantensteilheit (Gradientendifferenz) in den Abtastebenen an.

Die Gradientendifferenz bei Abtastung senkrecht zur Kante ist in Abb. 15 veranschaulicht. Das Vorzeichen der Gradientendifferenz ist abhängig von der Defokussierung und von der relativen Lage von Kantenbild und Trennungslinie der Abtastspalte. Diese Mehrdeutigkeit kann zu Fehleinstellungen führen. Die Maßnahmen zur Ausschaltung dieses Effektes werden in Abschnitt

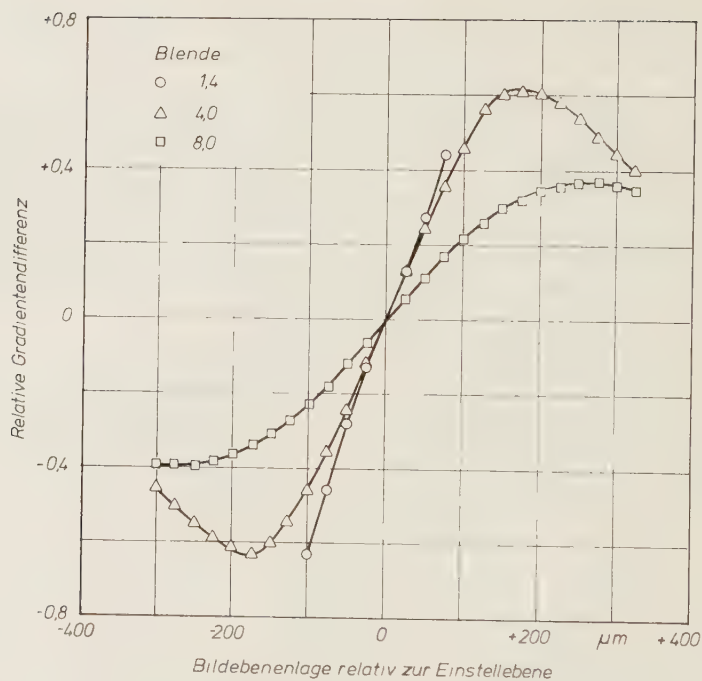


Abb. 14 Relative Gradientdifferenz in Abhängigkeit von der Bildebenenlage bei verschiedenen Blendenwerten

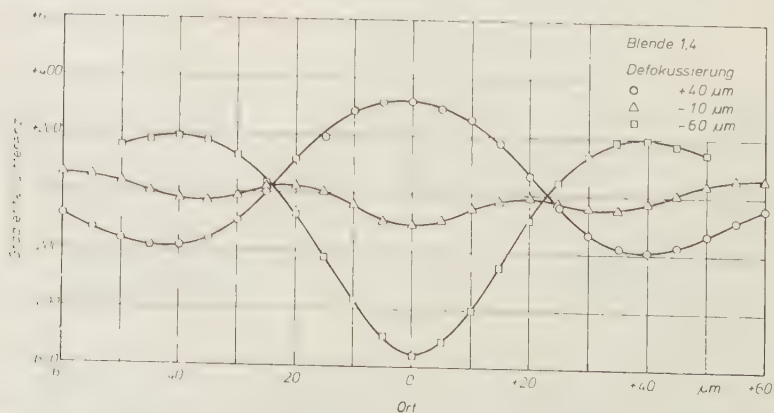


Abb. 15 Gradientdifferenz (beliebiger Ordinatenmaßstab) bei Abtastung senkrecht zur Kante für drei Einstellungen der Bildebene bei Blende 1,4

5.1.2.7. beschrieben. Der eindeutige Zusammenhang zwischen Defokussierung und Vorzeichen der Gradientendifferenz bleibt nach Abb.15 bei einer relativen Verschiebung von Kante und Trennungslinie um $\pm 20 \mu\text{m}$ erhalten.

Die Messung der Kantensteilheit erfolgt in einem kleinen Bereich in der Bildmitte. Die Wahl des Einstellkriteriums und des Meßverfahrens gewährleistet eine optimale Einstellung des Systems in der Bildmitte. Die Korrektur der optischen Systeme wird meist so vorgenommen, daß mit der Bildmitte auch die Randbezirke optimal eingestellt sind [45].

Bei einer Bildebenenlage außerhalb des Abtastbereiches bleibt der eindeutige Zusammenhang zwischen Defokussierung und Vorzeichen der Gradientendifferenz erhalten, wie der Verlauf der Kurven in Abb.14 zeigt.

Die Spaltlänge kann unter Berücksichtigung der Brennweite des Systems den Objektdimensionen angepaßt werden.

Ein endlicher Spaltabstand verringert den Abfall des Differenzlichtstromes bei Defokussierung. Die Größe dieses Einflusses kann aus den Abb.16a, b

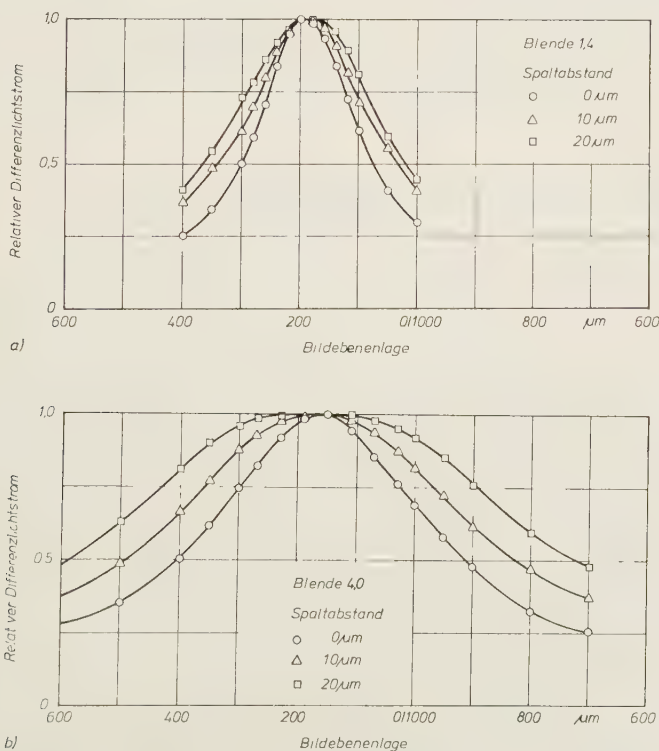


Abb. 16 Abnahme des relativen Differenzlichtstromes bei Defokussierung für verschiedene Spaltabstände bei den Blendenwerten 1,4 a) und 4,0 b)

24 ersehen werden, wo für ein $20\mu\text{m}$ -Doppelspaltsystem der relative Differenzlichtstrom bei Spaltabständen von 0, 10 und $20\mu\text{m}$ für die Blendenwerte 1,4 bzw. 4 in Abhängigkeit von der Defokussierung dargestellt ist. Die Kurvenschar für den Blendenwert 4 ist für das Verhalten bei mittleren Blendenzahlen typisch. Der Einfluß des Spaltabstandes wird mit wachsender Übergangsbreite geringer, wie ein Vergleich der beiden Kurvenscharen in den Abb. 16a, b zeigt.

4.3. Grenzen des Verfahrens

Da die Steilheit von Kantenbildern gemessen wird, versagt das Verfahren bei der Abbildung von gleichmäßig ausgeleuchteten Flächen oder wenn die Lichtstromdifferenzen unter der Nachweisgrenze der Anordnung liegen.

Störungen können außerdem durch starke Leuchtdichteänderungen am Außenrand der Abtastflächen auftreten, z. B. bei einer treppenförmigen Leuchtdichteverteilung, bei der die Breite der Stufen mit der Einzelspaltbreite übereinstimmt und die Stufenhöhe am Rand der Abtastflächen höher ist als an der Trennungslinie. Da beide Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein müssen, ist ein solcher Fall äußerst unwahrscheinlich, zumal der Beobachter die auszumessende Kante durch eine Sucheranordnung auswählen kann.

5. ENTWURF UND AUFBAU DES REGELKREISES

5.1. Regelstrecke

5.1.1. GERÄTEBILD UND BLOCKSCHALTBILD

Das in Kap. 4 beschriebene Verfahren zur Bestimmung des Gradienten einer Kante erfordert die Messung von Differenzlichtströmen. Die Differenzbildung geschieht nach Umwandlung in elektrische Ströme mittels photoelektrischer Wandler. Zur Festlegung der Defokussierungsrichtung wird eine Abtastung in zwei Ebenen vorgenommen, wobei das Vorzeichen der Gradientendifferenz die Defokussierungsrichtung angibt.

Der Doppelspalt kann durch eine Glasfaseranordnung verwirklicht werden.

Die Aufteilung des Strahlenganges zur Abtastung in zwei Ebenen wird mit einem Strahlenteiler vorgenommen.

Abb. 17 zeigt das Gerätebild der Regelstrecke. Zur Regelstrecke gehören das Objektiv und der Meßwertaufnehmer mit den Verstärkern.

Die Ausgangsspannung am Differenzverstärker D3 ist die Regelgröße x . Sie entspricht der Gradientendifferenz in den beiden Abtastebenen. Die Objektivlage ist die Stellgröße y . Bei gegebener Gegenstandsweite besteht

innerhalb des Abtastbereiches ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stellgröße y und Regelgröße x (vgl. Abb. 14). Für die Regelung ist nur die Änderung des Vorzeichens der Gradientendifferenz beim Übergang von negativer zu positiver Defokussierung wesentlich. Defokussierung b und Stellgröße y sind durch die Abbildungsgleichungen miteinander gekoppelt.

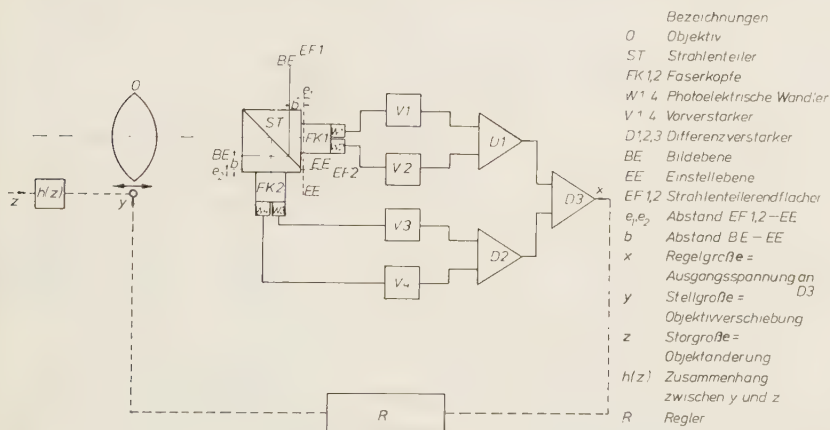


Abb. 17 Gerätebild der Regelstrecke

Die Änderung der Gegenstandsweite (Störgröße z) kann über die Abbildungsgleichungen als Lageänderung des Objektivs berücksichtigt werden. Der funktionale Zusammenhang ist durch den Block $y = h(z)$ gekennzeichnet.

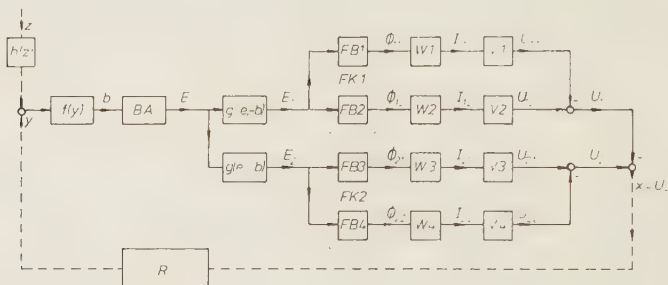
Bei der Ableitung des Blockschaltbildes (Abb. 18) aus dem Gerätebild wird der optische Abbildungsprozeß in zwei Teilprozesse zerlegt:

1. Abbildung von Ebenen nach den Abbildungsgleichungen
2. Bildaufbau in einer Ebene des Bildraumes

Der Abstand b der Bildebene von der Einstellebene ist bei fester Gegenstandsweite und vorgegebener Objektivlage y durch die Abbildungsgleichungen bestimmt ($b = f(y)$).

In der Bildebene entsteht durch den Bildaufbauprozess — dargestellt durch den Block BA — eine bestimmte Beleuchtungsstärkeverteilung E , die durch die Übertragungseigenschaften des Systems festgelegt ist. Die Abtastung wird in zwei Ebenen vorgenommen, die von der Bildebene den Abstand e_1-b bzw. e_2-b haben. Das Bild in der jeweiligen Abtastebene erleidet eine Verwaschung, die von dem Abstand e_1-b bzw. e_2-b abhängt. Dies ist im Blockschaltbild durch die beiden Funktionswerte $g(e_1-b)$ und $g(e_2-b)$ dargestellt. Der Verlauf der Funktion g wird durch das Meßverfahren bestimmt. Wie die Abb. 11 a... c zeigen, ist g eine gerade Funktion, d. h. $g(-a) = g(+a)$. In den Abtastebenen entstehen bei unterschiedlichen Werten des Arguments der Funktion g unterschiedliche Beleuchtungsstärkeverteilungen E_1, E_2 .

26 Am Ausgang der Faserbänder FB 1...4 tritt ein bestimmter Lichtstrom Φ_{ij} aus, der von der Beleuchtungsstärke am Eingang und von den Dimensionen des faseroptischen Querschnittswandlers abhängt.



x	Regelgröße	$h(z)$	Zusammenhang zwischen y und z
y	Stellgröße	$f(y)$	Zusammenhang zwischen b und y
z	Störgröße	$g(e-b)$	Verwischungsfunktion
b	Abstand Bildebene-Einstellebene	BA	Bildaufbau
e_1, e_2	Abstand Abtasteebene-Einstellebene	$FB 1 \dots 4$	Faserbündel
E	Beleuchtungsstärke in der Bildebene	$FK 1, 2$	Faserkopfe
E_1, E_2	Beleuchtungsstärke in den Abtastebenen	$W 1 \dots 4$	Photoelektrische Wandler
Φ_{ij}	Lichtströme	$V 1 \dots 4$	Verstärker
I_{ij}	Elektrische Ströme	R	Regler
U_{ij}	Elektrische Spannungen		
U_1, U_2, U_3	Ausgangsspannung an dem Verstärker		

Abb. 18 Blockschaltbild der Regelstrecke

Nach Umwandlung in elektrische Ströme I_{ij} durch photoelektrische Wandler $W 1 \dots 4$ und Verstärkung stehen elektrische Spannungen U_{ij} zur Verfügung, die nach einer zweistufigen Differenzbildung die Regelgröße x ergeben.

Die Abtastebenen werden symmetrisch zur Einstellebene angeordnet, d. h. $e_1 = e_2 = e$. Unter dieser Bedingung werden die Funktionswerte in den Blöcken:

$$g(e-b) \text{ und } g(-e-b) = g(e+b)$$

Bei optimaler Einstellung fallen Bild- und Einstellebene zusammen, d. h. $b = 0$. Dann werden wegen $g(-e) = g(+e)$ die Beleuchtungsstärkeverteilungen E_1 und E_2 gleich. Daraus folgt für die Lichtströme Φ_{ij} am Ausgang der Faserbänder:

$$\Phi_{11} = \Phi_{21}, \Phi_{12} = \Phi_{22}$$

Die entsprechenden Beziehungen gelten auch für die Spannungen U_{ij} . Damit wird:

$$U_1 = U_2, U_3 = x = 0$$

d. h. die Regelgröße x wird Null, wenn Bild- und Einstellebene zusammenfallen. Der Sollwert w ist also durch $w = 0$ gegeben.

Da diese Beziehungen für jede beliebige Beleuchtungsstärkeverteilung E gelten, ist die Regelgröße x unabhängig von der Leuchtdichte des Objektes und damit auch unabhängig von Bewegungen des Objektes in der Gegenstandsebene.

5.1.2. BESCHREIBUNG DER EINZELGRUPPEN

5.1.2.1. Objektiv

Aberrationskurven, Linienbild- und Kantenbildkurven, sowie die Übertragungsfunktionskurven eines Objektivs vom Typ Xenon 1,4/25 sind in Kap. 4 dargestellt.

Eine Abschätzung des Schärfentiefebereichs gibt Aufschluß über die erforderliche Einstellgenauigkeit.

Nach FRANKE [46] gilt für den Abstand e_N , e_F der Grenzebenen für den Schärfentiefebereich ohne Berücksichtigung der Restaberrationen des optischen Systems:

$$e_{F,N} = e \cdot f^2 / (f^2 \mp d' (e + f / \beta'_p))$$

Dabei ist e der Abstand der zur Einstellebene konjugierten Gegenstandsebene, d' der Durchmesser des bildseitigen Zerstreuungskreises und β'_p die Pupillenvergrößerung.

Bei Betrachtung aus dem Normalabstand gilt:

$$d' = f \cdot \eta$$

wobei $\eta = 0,0005$ die winkelmäßige Sehschärfe des Auges ist.

Damit wird:

$$e_{F,N} = e \cdot f / (f \mp \eta t (e + f / \beta'_p))$$

Durch Einsetzen in die Abbildungsgleichungen folgt für den Abstand $e'_N - e'_F$ im Bildraum die Näherungsformel:

$$e'_N - e'_F = 2\eta f / (1 + 2f / (\beta'_p e + f))$$

Für große Gegenstandsweiten kann diese Gleichung weiter vereinfacht werden zu

$$e'_N - e'_F = 2\eta f$$

In Tab. 3 sind die Differenzen für die verschiedenen Blendenwerte t und für eine Brennweite von 25 mm zusammengestellt.

28 Tab. 3: Grenzebenenabstand $e'_N - e'_F$ für den Schärfentiefebereich bei verschiedenen Blendenwerten t und einer Brennweite von 25 mm.

Blendenwert t	$e'_N - e'_F$ [μm]
1,4	35
2,0	50
2,8	70
4,0	100
5,6	140
8,0	200
11,0	275
16,0	400
22,0	550

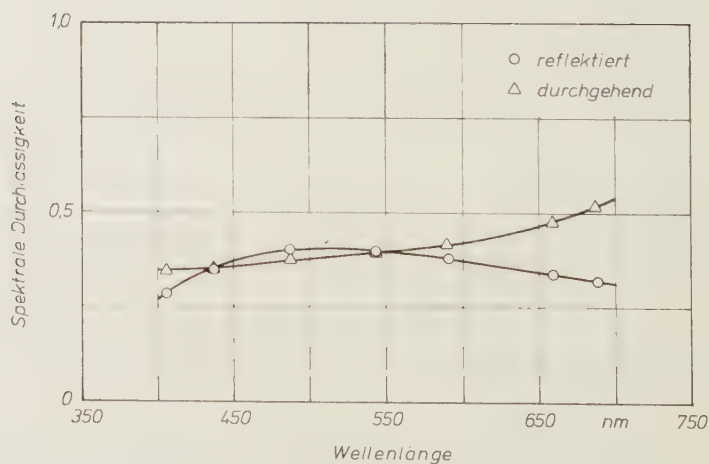


Abb. 19 Spektrale Durchlässigkeit des Strahlenteilers

Die beiden Endflächen des Strahlenteilers legen die Abtastebene fest, wobei die optische Wegdifferenz dem in Abschnitt 4.2. angegebenen Wert entspricht.

Beim Aufbau der Versuchsanordnung konnte ein im Haus SCHNEIDER gefertigter Strahlenteiler eingesetzt werden. Die spektralen Durchlässigkeitskurven sind in Abb. 19 dargestellt.

Am langwelligen Ende des sichtbaren Spektralbereichs werden die Werte für durchgehendes und abgelenktes Licht merklich verschieden. Da auch die Aberrationen des Objektivs bei längeren Wellenlängen stark zunehmen, wird ein Bandfilter für den Wellenlängenbereich von 400 bis 750 nm eingesetzt. Die spektrale Durchlässigkeit des Interferenz-Wärme-Reflexionsfilters der Firma Balzers vom Typ Calflex-C zeigt Abb. 23.

5.1.2.3. Faseroptischer Querschnittswandler

Die Abtastspalte mit gemeinsamer Trennungslinie werden durch einen faseroptischen Querschnittswandler verwirklicht, dessen Aufbau Abb. 20 zeigt.

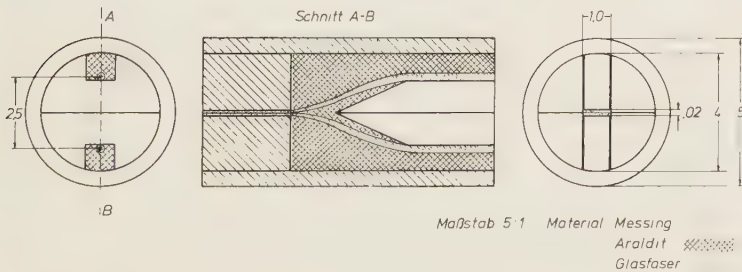


Abb. 20 Aufbau des faseroptischen Querschnittswandlers

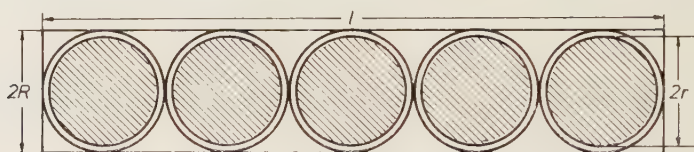
Die spektrale Durchlässigkeit der Glasfaser ist im sichtbaren Spektralgebiet praktisch konstant.

Die Ausstrahlcharakteristiken von Faserbündeln unter verschiedensten Einstrahlbedingungen und bei schrägen Faserenden sind in einer Informationsschrift des Hauses SCHNEIDER [47] ausführlich dargestellt.

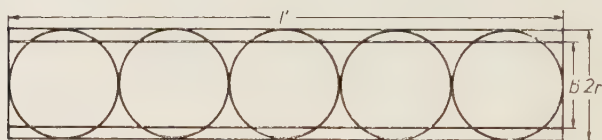
Glasfasern sind mit Durchmessern von $10\mu\text{m}$ an erhältlich. Die Flexibilität nimmt mit zunehmendem Faserdurchmesser ab. Die Dicke des Fasermantels beträgt etwa $2\mu\text{m}$. Der Fasermantel trägt zur Lichtleitung nicht bei.

Für die Abtastung mit Spalten optimaler Dimension kommen nur Faserbänder in Frage (evtl. zwei Bänder aus $10\mu\text{m}$ -Fasern).

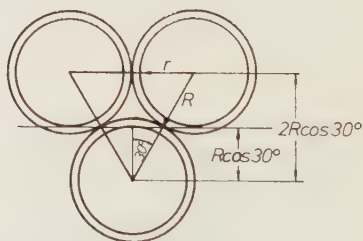
- 30 Die wirksame Spaltfläche bei Abtastung mit einem Faserband ist in Abb. 21a schraffiert.



a)



b)



c)

Abb. 21 Packungsverhältnisse bei Glasfasern

- a) Wirksame Spaltfläche bei einem Faserband (schraffiert)
b) Wirksame Spaltlänge und Spaltbreite
c) Anordnung der Fasern auf Lücke

Die Anzahl n der Fasern pro Lage ist:

$$n = l / 2R$$

wobei l die Spaltlänge und R der Faserradius ist.

Die Spaltlänge l ist durch den Einfluß des Fasermantels auf die wirksame Länge l' reduziert. Zwischen den beiden Größen besteht die Beziehung:

$$l' = lr / R$$

wobei r der Kernradius ist.

Nach Abb. 21b gilt für die wirksame Spaltbreite b' :

$$b' = \pi r / 2$$

Bei Berührung der Bänder entsteht ein effektiver Spaltabstand d von

31

$$d = 2(R - r) + 2(r - b'/2)$$

wobei der erste Summand den Einfluß der Manteldicke und der zweite den der Kreisflächen berücksichtigt.

Werden die Fasern auf Lücke gelegt (Abb.21c), so kann der Einfluß der Manteldicke auf den Spaltabstand d verkleinert werden und bei einem Verhältnis zwischen Kernradius r und Faserradius R von $r/R = \cos 30^\circ$ ganz eliminiert werden.

Bei größeren Einzelspaltbreiten B können entweder Faserbänder aufeinander geschichtet werden oder Einzelfasern in einen Spalt (Länge l) eingepreßt werden. Die Anzahl der Lagen bei Bändern n_B bzw. Einzelfasern n_F ist durch die Gleichungen

$$n_B = B / 2R, \quad n_F = B / (2R \cos 30^\circ)$$

bestimmt.

Die wirksame Spaltbreite B'_B bzw. B'_F ist dann durch

$$B'_B = n_B \cdot b', \quad B'_F = n_F \cdot b'$$

gegeben.

Ein Kanal des beim Versuchsaufbau verwendeten faseroptischen Querschnittswandlers enthält 250 Einzelfasern mit einem Durchmesser von $20 \mu\text{m}$, die in einem Spalt von 1 mm Länge eingeschichtet sind. Dann ist $n = 50$, $n_F = 5$, $B = 86 \mu\text{m}$ und $B'_F = 62 \mu\text{m}$.

Wegen Anpassungsschwierigkeiten zwischen faseroptischem Querschnittswandler und Photodiode sind die Einzelspaltbreiten gegenüber den in Kap.4 angegebenen optimalen Werten erhöht. Die Funktion der Anordnung ist bei diesen Abmessungen für kleine und mittlere Blendenzahlen gewährleistet, wie der Verlauf der relativen Differenzlichtstromkurven in Abb.11 zeigt.

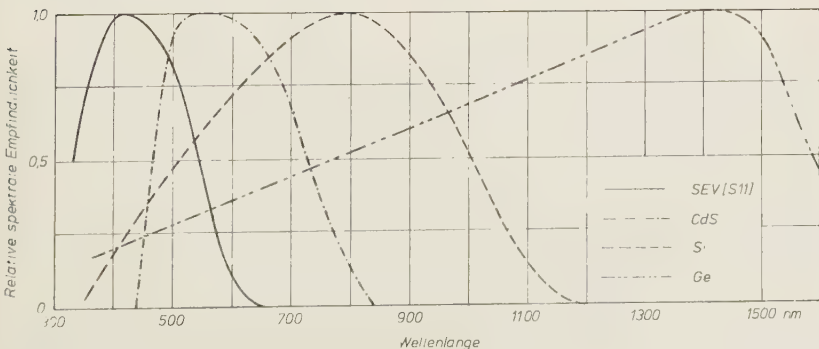


Abb. 22 Relative spektrale Empfindlichkeit photoelektrischer Wandler

Die spektrale Empfindlichkeit verschiedener photoelektrischer Wandler veranschaulicht Abb. 22. Für den Einsatz bei einer Anordnung zur Scharfeinstellung ist eine ausreichende Empfindlichkeit im sichtbaren Spektralgebiet erforderlich. In Tab. 4 sind wichtige Daten der verschiedenen photoelektrischen Wandler angegeben.

Beim Versuchsaufbau werden Photodioden der Firma Hewlett-Packard vom Typ hp 4205 eingesetzt. Hinsichtlich des Rauschens sind sie wegen des geringen Reststromes optimal. Hinzu kommen die günstigen Abmessungen und der relativ niedrige Preis.

Tab. 4: Äquivalentwert S_m , lichtempfindliche Fläche F , Äquivalentwert pro Flächeneinheit S'_m und Reststrom I_R verschiedener photoelektrischer Wandler

(D = Diode, T = Transistor, W = Widerstand,
K = Kathode, An = Anode, CB = Kollektor-Basis-Strecke,
CE = Kollektor-Emitter-Strecke)

Bezeichnung	Typ	S_m $\mu A \cdot cm^2 \cdot mW^{-1}$	F cm^2	S'_m $\mu A \cdot \mu W^{-1}$	I_R nA
Si-D	SD-100	17,5	$7,3 \cdot 10^{-2}$	0,25	200
Si-D	hp 4205	1,5	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,50	0,1
Si-T	BPY 60	CB: 1,69	$2,7 \cdot 10^{-1}$	0,007	10
		CE: 1690		6,5	
Ge-D	APY 12	9,1	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,9	8000
CdS-W	CL5D7	$1,9 \cdot 10^5$ bei 15 V	$9,5 \cdot 10^{-1}$	200	
SEV (K)	RCA-4524	2240	32	0,07	(An) 1

Die Lichtempfindlichkeit S_K der Kombination aus Filter (Calflex-C) und Photodiode (hp 4205) kann nach Gleichung (9) (3.2.) bestimmt werden. $s_{rel}(\lambda)$ ist die relative spektrale Empfindlichkeit der Kombination, deren Verlauf Abb. 23 zeigt. Gleichzeitig ist dort die relative spektrale Empfindlichkeit der Diode und die relative spektrale Durchlässigkeit des Filters eingetragen.

Für das Maximum von $s_{rel}(\lambda)$ kann ein Äquivalentwert S_{mK} angegeben werden, der durch den Absolutwert der Empfindlichkeit der Diode und der Durchlässigkeit des Filters bei 700 nm bestimmt ist. Nach Abb. 23 ist:

$$S_{mK} = 1,5 \cdot 0,87 \cdot 0,86 \mu A \cdot mW^{-1} \cdot cm^2 = 1,12 \mu A \cdot mW^{-1} \cdot cm^2$$

Der erste Faktor gibt den Äquivalentwert für die Diode im Maximum bei 800 nm an.

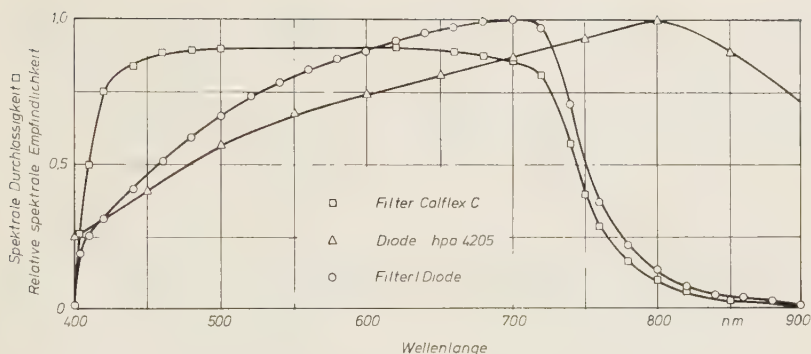


Abb. 23 Relative spektrale Empfindlichkeit der Kombination Filter/Photodiode zusammen mit der relativen spektralen Empfindlichkeit der Photodiode und der spektralen Durchlässigkeit des Filters

Die in Gleichung (9) auftretenden Integrale werden durch numerische Integration ermittelt. Das Verhältnis

$$\int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda / \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda = f(T)$$

ist bei vorgegebenem Verlauf von $s_{rel}(\lambda)$ nur noch eine Funktion $f(T)$ der

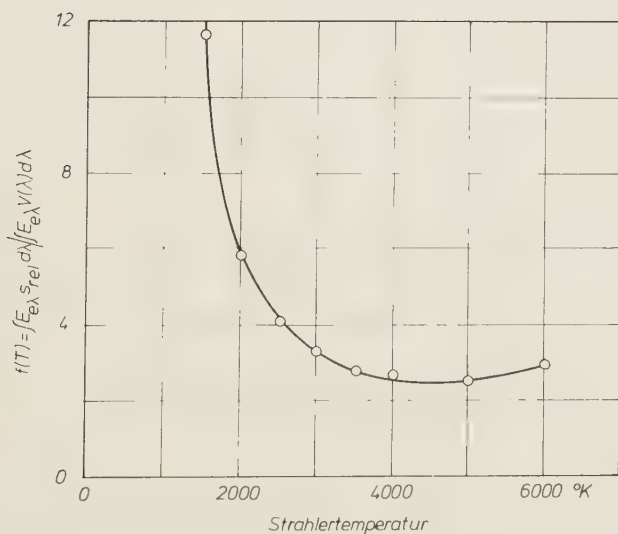


Abb. 24 Verlauf der Funktion $f(T) = \int E_{e\lambda}(\lambda) s_{rel}(\lambda) \cdot d\lambda / \int E_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
(T = Temperatur des Schwarzen Strahlers)

34 absoluten Temperatur T . Den Verlauf der Funktion $f(T)$ für die Kombination von Filter und Photodiode veranschaulicht Abb. 24.

Für niedrige Strahlertemperaturen nimmt $f(T)$ große Werte an, weil das Integral im Nenner stärker gegen Null geht als das Integral im Zähler. Für Strahlertemperaturen über 2500° K kann $f(T) \approx 3$ gesetzt werden.

Damit wird die Lichtempfindlichkeit S_K der Kombination Filter/Photodiode nach Gleichung (9) mit $K_m = 680 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$:

$$S_K \approx 3 \cdot S_{mK} / K_m = 3 \cdot 1,12 \cdot 1,47 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{lm}^{-1} = 4,95 \cdot 10^{-10} \text{ A} \cdot \text{lx}^{-1}$$

Die lichtempfindliche Fläche der Photodiode hat eine Fläche von $3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. Bei der Messung des Lichtstromes durch den Abtastspalt geht das Verhältnis der beiden Flächen ein. Mit den angegebenen Spaltdimensionen (20 μm , 1 mm) folgt für die Lichtempfindlichkeit S_S :

$$S_S = 4,95 \cdot 10^{-10} \cdot 2/3 \cdot 10^{-1} \text{ A} \cdot \text{lx}^{-1} = 3,3 \cdot 10^{-11} \text{ A} \cdot \text{lx}^{-1}$$

Unter Berücksichtigung der Aufteilung durch den Strahlenteiler im Verhältnis 1:1 wird also die Lichtempfindlichkeit S eines Kanals:

$$S = 1,65 \cdot 10^{-11} \text{ A} \cdot \text{lx}^{-1} \quad (12)$$

Der effektive Rauschstrom beträgt nach Gleichung (13): $6,5 \cdot 10^{-12} \text{ A}$. Bei einer Beleuchtungsstärke von 1 lx ist das Signal-Rausch-Verhältnis etwa 3:1. Bei Begrenzung der Frequenzbandbreite auf 10 kHz wird das Verhältnis um den Faktor $\sqrt{10}$ besser.

Die Beleuchtungsstärke bei Sonnenlicht beträgt etwa 5000 bis 6000 lx. Dann ist die Objektleuchtdichte bei einem mittleren Remissionsgrad von 0,5 etwa 2500 bis 3000 Apostilb (asb). Bei verlustfreier Abbildung sind Objekt- und Bildleuchtdichte gleich. Die Beleuchtungsstärke nimmt mit dem Quadrat der bildseitigen Apertur ab (Gleichung (3) in Abschnitt 3.1.). Für die Blendenzahl 1,4 ist $\sin^2 u' = 0,113$. Bei stufenweiser Erhöhung der Blendenzahl tritt jeweils eine Reduzierung um den Faktor zwei ein. Bei einer Objektleuchtdichte von 2500 asb wird die Beleuchtungsstärke in der Bildebene etwa 280 lx bei voller Öffnung und etwa 1 lx bei Blende 22.

Für die angegebenen Spaltdimensionen ist die Empfindlichkeit der Photodiode bei normalen Lichtverhältnissen ausreichend.

Das thermische Rauschen des Arbeitswiderstandes $R_L = 44 \text{ M}\Omega$ bei einer Frequenzbandbreite von 100 kHz wird nach Gleichung (10) bei Zimmertemperatur ($T = 300^\circ \text{ K}$):

$$(\delta i_v)^2 = 4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ V Asec} \cdot \text{grd}^{-1} \cdot 300 \text{ grd} \cdot 10^5 \text{ sec}^{-1} / 4,4 \cdot 10^7 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1} \\ 37,6 \cdot 10^{-24} \text{ A}^2$$

Gleichung (11) für das Schrotrauschen liefert bei einem Reststrom von $1,5 \cdot 10^{-10} \text{ A}$:

$$(\delta i_s)^2 = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Asec} \cdot 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ A} \cdot 10^5 \text{ sec}^{-1} = 4,8 \cdot 10^{-24} \text{ A}^2$$

Da die Rauschquellen unkorreliert sind, ist der Gesamtrauschstrom i_r durch die Wurzel aus der Summe der Absolutwertquadrate gegeben. Er beträgt:

$$i_r = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ A} \quad (13)$$

Als Wert für die Gesamtrauschspannung am Arbeitswiderstand von $44 \text{ M}\Omega$ wird für die weiteren Berechnungen $300 \mu\text{V}$ zugrundegelegt.

Bei Beleuchtung kommt ein Anteil durch das Schrotrauschen des zusätzlich erzeugten Stromes hinzu, der aber das Signal-Rausch-Verhältnis nicht verschlechtert, da die effektive Rauschspannung mit der Wurzel des Stromes, die Signalspannung aber proportional zum Strom ansteigt.

Die Zeitkonstanten des Regelkreises sind im Vergleich zu denen der Vorverstärker und Differenzverstärker groß. Die Ausgangsspannungen werden durch diese Glieder geglättet, d. h. die Rauschspannungen werden durch Beschneiden des wirksamen Frequenzbandes stark reduziert. Der Einfluß des Modulationsrauschens wird durch die Zeitkonstanten der genannten Glieder allerdings nicht vermindert.

Vorverstärker und Differenzverstärker sind breitbandig ausgelegt, damit auch schnelle Bewegungen erfaßt werden können. Das Nutzsignal bei schneller Relativbewegung von Kantenbild und Abtastsystem muß wesentlich über dem Rauschpegel liegen. Durch Impulsdehnung kann dann eine Anpassung an die übrigen Regelkreisglieder vorgenommen werden.

5.1.2.5. Vorverstärker

Der Eingangswiderstand der Vorverstärker muß größer sein als der Lastwiderstand der Photodiode. In Halbleiterschaltungen kann dies am einfachsten durch Einsatz von Feldeffekttransistoren erreicht werden. Da mit wachsendem Lastwiderstand die Grenzfrequenz der Diode sinkt, muß durch geeignete schaltungstechnische Maßnahmen die Eingangsimpedanz des Vorverstärkers klein gehalten werden.

Der Temperaturgang von Feldeffekttransistoren ist durch zwei gegenläufige Effekte bestimmt, die vom Drainstrom abhängig sind. Bei optimaler Wahl des Drainstromes kann der Temperaturgang des Verstärkers stark reduziert werden.

Die wichtigsten Daten des Vorverstärkers sind in Tab. 5 zusammengestellt.

Tab. 5: Daten des Vorverstärkers

Bezeichnung	Abkürzung	Zahlenwerte	Einheit
Eingangsstrom	I_E	max. 0,5	nA
Spannungsverstärkung	A_V	var. 1 ... 80	
Frequenzgang		0 ... 40	kHz
Temperaturdrift		2	mV / °C
Betriebsspannung	U_B	± 15	V

36 Die Spannungsempfindlichkeit S_V der Kombination Filter / Photodiode / Vorverstärker kann aus dem im vorigen Abschnitt angegebenen Wert für die Lichtempfindlichkeit S_K unter Berücksichtigung der Größe des Lastwiderstandes und der Spannungsverstärkung des Vorverstärkers berechnet werden.

Bei einer Strahlertemperatur über 2500° K wird die Spannungsempfindlichkeit S_V (ohne Strahlenteiler und faseroptischen Querschnittwandler):

$$S_V = S_K \cdot R_L \cdot A_V = 4,95 \cdot 10^{-10} \cdot 4,4 \cdot 10^7 \cdot 1 \text{ V} \cdot \text{lx}^{-1} \\ = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{lx}^{-1}$$

Dieser Wert gilt für einen Lastwiderstand von $R_L = 44 \text{ M}\Omega$ und eine Spannungsverstärkung von $A_V = 1$.

5.1.2.6. Differenzverstärkerstufe

Die Differenzverstärkerstufe ist aus drei Operationsverstärkern aufgebaut.

Der ideale Operationsverstärker ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

1. Verstärkung: Unendlich
2. Eingangsimpedanz: Unendlich
3. Ausgangsimpedanz: Null
4. Phasendrehung: 180° Grad

Abb. 25 zeigt das Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers.

Darin sind I_{B1} , I_{B2} die Eingangsströme in den Verstärker (Biasstrom), U_{off} ist die Spannungsdifferenz am Eingang bei einer Ausgangsspannung $U_A = 0$,

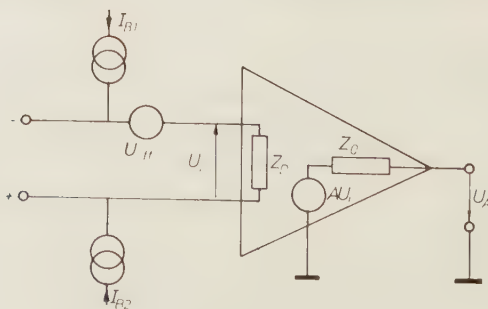


Abb. 25 Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers

Z_i die Eingangsimpedanz, Z_o die Ausgangsimpedanz, A die Spannungsverstärkung und U_i die Spannung an den Eingangsklemmen.

Für die Schaltung als Differenzverstärker gilt folgendes Ersatzschaltbild (Abb. 26).

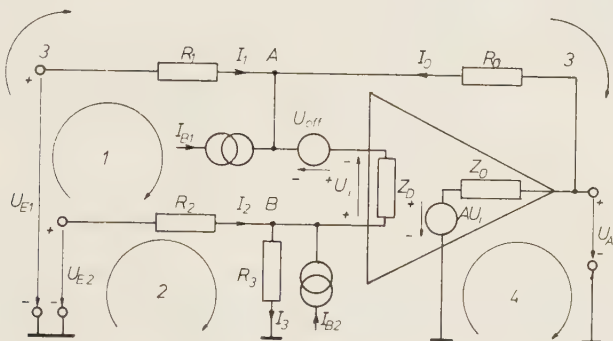


Abb. 26 Schaltung eines Operationsverstärkers als Differenzverstärker

Durch Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze für die Punkte A und B und die Schleifen 1...4 kann eine Beziehung zwischen der Ausgangsspannung U_A und den Spannungen U_{E1} , U_{E2} an den beiden Eingängen aufgestellt werden, in der nur noch die aus den Datenblättern zu entnehmenden Größen enthalten sind. Mit den in der Abb. 26 angegebenen Bezeichnungen gilt:

Punkt A:	I_1	+	I_{B1}	+	I_0	+	U_i / Z_D	= 0
B:	I_2	+	I_{B2}	-	I_3	-	U_i / Z_D	= 0
Schleife 1:	U_{E1}	-	$I_1 R_1$	+	U_i	+	$U_{off} + I_2 R_2 - U_{E2}$	= 0
2:	U_{E2}	-	$I_2 R_2$	-	$I_3 R_3$			= 0
3:	U_{E1}	-	$I_1 R_1$	+	$I_0 R_0$	-	U_A	= 0
4:	$A U_i$	-	$I_L Z_D$	-	U_A			= 0

Die Durchrechnung ergibt nach Eliminierung von $I_0 \dots I_3$ folgende Beziehung zwischen U_A und U_{E1} , U_{E2} :

$$\begin{aligned}
 U_A (1 + (R_0 + R_1) / A R_1 + R_2 R_3 (R_0 + R_1) / A Z_D) = & \\
 U_{E2} R_3 (R_0 + R_1) / R_1 (R_2 + R_3) - U_{E1} R_0 / R_1 - I_{B1} R_0 + & \\
 I_{B2} R_2 R_3 (R_0 + R_1) / R_1 (R_2 + R_3) - U_{off} (R_0 + R_1) / R_1 - & \\
 Z_O I_L / A Z_D \cdot (Z_D (R_0 + R_1) / R_1 + R_2 R_3 (R_0 + R_1) / R_1 (R_2 + R_3) + R_0) &
 \end{aligned} \quad (14)$$

Für $R_1 = R_2$ und $R_0 = R_3$ wird aus Gleichung (14):

$$\begin{aligned}
 U_A (1 + (R_0 + R_1) / A R_1 + R_0 / A Z_D) = & (U_{E2} - U_{E1}) R_0 / R_1 \\
 + (I_{B2} - I_{B1}) R_0 - U_{off} (R_0 + R_1) / R_1 - & Z_O I_L / A Z_D \cdot (Z_D (R_0 + R_1) / R_1 + 2 R_0).
 \end{aligned}$$

Abb. 27 zeigt die Schaltung der Differenzverstärkerstufe. Die Gleichspannungspegel an den Vorverstärkern sind einstellbar, so daß die Fehlerspannungen

der Operationsverstärker kompensiert werden können, zumindest für eine bestimmte Umgebungstemperatur. Die Temperaturdrift ist dann durch die der Vorverstärker und die Offset-Spannungsdrift der Operationsverstärker bestimmt. Durch geeignete Anpassung der einzelnen Temperaturgänge kann eine teilweise Kompensation erreicht werden.

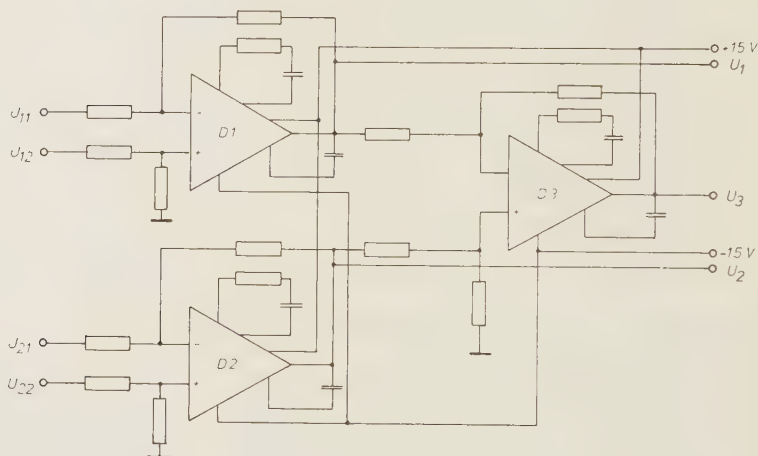


Abb. 27 Schaltung der Differenzverstärkerstufe

Die Belastung der Differenzverstärker D1 und D2 durch die nachfolgende Schaltung liegt bei maximal 0,1 mA. Die RC- bzw. C-Glieder dienen zur Frequenzkompensation, d. h. zur Schwingungsunterdrückung oder zur Wahl einer bestimmten Bandbreite.

Die Spannung U_1 liegt am invertierenden, die Spannung U_2 am nicht-invertierenden Eingang des Differenzverstärkers D3. Die Vorzeichen von U_1 und U_2 sind immer gleich, da die Spannungen U_1 , U_2 proportional zu den Differenzlichtströmen in den Abtastebenen sind und jeweils derselbe Bildausschnitt erfaßt wird. Bei positiven Spannungen U_1 , U_2 gilt:

$$\begin{aligned} U_3 &< 0 \quad \text{für} \quad U_1 > U_2 \\ U_3 &> 0 \quad \text{für} \quad U_1 < U_2 \end{aligned} \quad (15)$$

Bei negativem Vorzeichen von U_1 bzw. U_2 ist:

$$\begin{aligned} U_3 &> 0 \quad \text{für} \quad |U_1| > |U_2| \\ U_3 &< 0 \quad \text{für} \quad |U_1| < |U_2| \end{aligned} \quad (16)$$

d. h. die Ausgangsspannung U_3 hängt außer von der Defokussierungsrichtung noch von der Objektleuchtdichte ab.

Diese Mehrdeutigkeit kann prinzipiell durch Gleichrichtung der Spannungen U_1 und U_2 beseitigt werden. Um aber eine Störung der Differenzspannung U_3

zu vermeiden, die für die Genauigkeit der Einstellung maßgebend ist, und um die bei Bewegung des Abtastelementes senkrecht zur Kante auftretenden Störsignale zu eliminieren, wird im nächsten Abschnitt eine Torschaltung zur Vorzeichenumkehrung und zur Ausschaltung der Störsignale angegeben.

Ein Meßwertaufnehmer, bestehend aus faseroptischen Querschnittswandlern, photoelektrischen Wandlern, Vorverstärkern und Differenzverstärkerstufe, genügt bereits für eine vollautomatische Scharfeinstellung, wenn die Trennungslinie der Abtastspalte mit der Kante zusammenfällt und nur Übergänge mit Gradienten eines Vorzeichens abgetastet werden.

5.1.2.7. Torschaltung

Aus den Gleichungen (15) und (16) folgt die Eindeutigkeit des Zusammenhangs zwischen Defokussierungsrichtung und Vorzeichen der Spannung U_3 durch Vorzeichenumkehrung bei positiven (oder negativen) Spannungen U_1 , U_2 .

Abb. 28 zeigt die Prinzipschaltung zur Vorzeichenumkehrung. Die Tore T_+ und T_- öffnen bei positiver bzw. negativer Spannung U_1 . Die der Gradientendifferenz entsprechende Spannung U_3 gelangt auf den invertierenden bzw. auf den nicht-invertierenden Eingang des Operationsverstärkers OP.

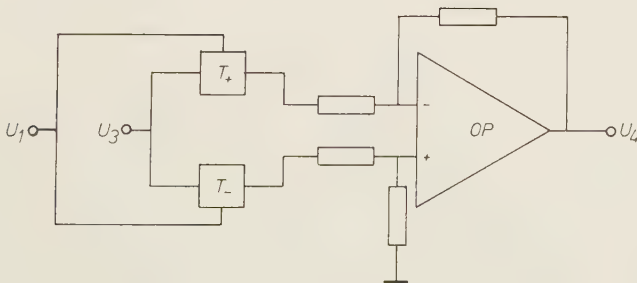


Abb. 28 Prinzipschaltung zur Vorzeichenumkehrung

Das Verhalten der Spannungen U_1 , U_2 bei Abtastung senkrecht zu einer Kante entspricht dem der Differenzlichtströme in Abb. 12. Werden die Tore T_+ oder T_- erst bei Spannungswerten U_1 geöffnet, die größer sind als die Hälfte des maximal auftretenden Spannungshubes an den Differenzverstärkern D1 und D2, so entsteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Defokussierung und Ausgangsspannung am Operationsverstärker OP.

Bei Relativbewegung von Bild und Abtastelement treten nur kurze Impulse auf, die zur Ansteuerung des Reglers gedehnt werden müssen. Die Verringerung der Zahl der für die Einstellung verwertbaren Impulse durch die Einführung eines solchen Schwellenwertes bedeutet daher keine wesentliche Einschränkung.

40 Abb. 29 zeigt eine Prinzipschaltung zur Variation des Schwellenwertes. Über ein Tor T1 gelangt eine der Spannungen U_1, U_2 in den Speicher S (Kondensator). Das Tor T1 wird geschlossen, wenn der Komparator K1 die Gleichheit

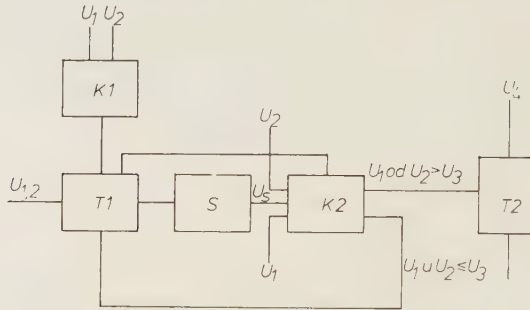


Abb. 29 Prinzipschaltung zur Variation des Schwellenwertes

von U_1 und U_2 anzeigt. In diesem Fall wird durch einen zweiten Komparator K2 ein Vergleich der gerade am Speicher S liegenden Spannung U_S mit den Spannungen U_1, U_2 durchgeführt. Ist eine der Spannungen größer als U_S , so wird das Tor T2 geöffnet und die Spannung U_4 gelangt auf den Eingang des

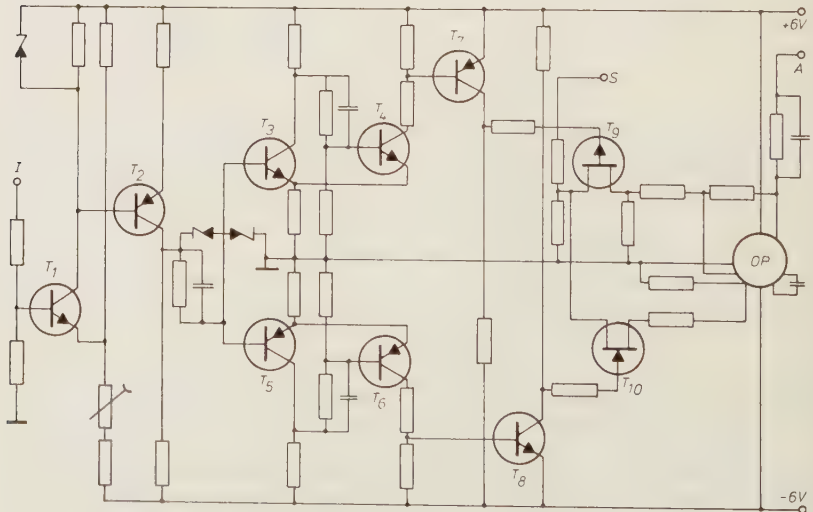


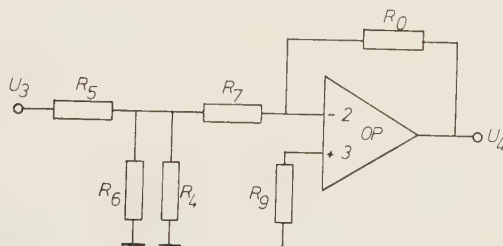
Abb. 30 Torschaltung

Kraftverstärkers. Andernfalls wird das Tor T1 wieder geöffnet. Bei optimaler Einstellung des Systems gilt für das Maximum die Bedingung $U_1 = U_2$. Bei Defokussierung wird aber eine der Spannungen größer als dieser Wert, so daß die Schaltung auch in diesem Fall eindeutig arbeitet.

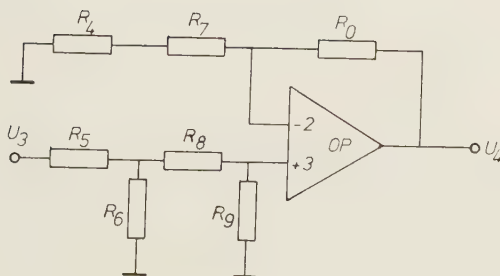
Für den Aufbau des Versuchsmodells ist das erste Verfahren gewählt worden. Abb. 30 zeigt die Schaltung dieser Anordnung. Die Schmitt-Trigger mit den Transistoren T_3, T_4 bzw. T_5, T_6 schalten über je eine Anpassungsstufe T_7 bzw. T_8 die beiden Tore, bestehend aus zwei Feldeffekttransistoren T_9 und T_{10} . Die Transistoren T_1 und T_2 bilden eine Anpassungsstufe an den Differenzverstärker D1, dessen Ausgangsspannung zur Schaltung der beiden Tore benutzt wird. Der Anschluß S ist mit dem Ausgang des Verstärkers D3 verbunden.

Die Anstiegs- und Abfallzeit t_r bzw. t_f der Schaltung ist:

$$t_r = 1 \mu\text{sec}, t_f = 0,3 \mu\text{sec}.$$



a)



b)

Abb. 31 Ersatzschaltbild für den Operationsverstärker in der Torschaltung bei geöffnetem Tor T_+ a) bzw. T_- b)

Im Betrieb ist jeweils eines der beiden Tore geöffnet. Die Ersatzschaltbilder für die beiden Fälle sind in den Abb. 31a, b dargestellt. Da die Eingangsspannung des hier eingesetzten Operationsverstärkers auf $-4 \dots +1 \text{ V}$ begrenzt ist, wird die Spannung U_3 durch den Teiler R_5/R_6 im Verhältnis 1:15

42 geteilt und durch den Operationsverstärker OP wieder auf den vollen Wert verstärkt.

1. Fall: T_9 geöffnet, T_{10} geschlossen (Abb. 31a)

(Der Bahnwiderstand des geöffneten Feldeffekttransistors kann vernachlässigt werden).

Zwischen der Ausgangsspannung U_4 am Operationsverstärker OP und der Eingangsspannung U_3 besteht die Beziehung:

$$U_4 = - U_3 R_0 R_4 R_6 / (R_7 R_4 R_5 + R_7 R_5 R_6 + R_7 R_4 R_6) \quad (17)$$

Der Widerstand R_9 muß so gewählt werden, daß

$$R_9 I_{off} (R_0 + R_7 + R_4) / (R_7 + R_4) < 0,5 \text{ V}$$

ist, da der Offset-Strom über R_9 fließt, wie aus Gleichung (14) für R_2 gegen Unendlich folgt.

2. Fall: T_9 geschlossen, T_{10} geöffnet (Abb. 31b)

Unter der Bedingung $R_6 \ll R_8 + R_9$ gilt:

$$U_4 = U_3 R_6 R_9 (R_0 + R_7 + R_4) / (R_5 + R_6) (R_8 + R_9) (R_7 + R_4) \quad (18)$$

Aus den Gleichungen (17) und (18) kann mit $U_3' = U_4$ R_4 und R_7 errechnet werden.

5.1.2.8. RC - Glied

Wegen der hohen Empfindlichkeit der Eingangsstufe und der hohen Verstärkung in der Differenzverstärkerstufe ist der Ausgangsspannung U_4 ein relativ hoher Rauschanteil überlagert, der zu Störungen führen kann. Die Zeitkonstante der Verstärkerstufe kann durch ein RC-Glied der relativ hohen Zeitkonstante des Reglers angepaßt werden. Dadurch wird die wirksame Bandbreite von Vorverstärker und Differenzverstärkerstufe stark reduziert und das Rauschen weitgehend unterdrückt. Bei der Scharfeinstellung auf bewegte Objekte wird das RC-Glied nach der Stufe zur Impulsdehnung geschaltet, damit die Grenzfrequenz der Anordnung nicht zu stark reduziert wird.

Die optimale Zeitkonstante des RC-Gliedes wird bei der Auslegung des Regelkreises bestimmt.

5.2. Regler

5.2.1. BLOCKSCHALTBILD

Der Regler besteht im Prinzip aus Vergleichler VG, Übertrager Ü, Kraftverstärker KV und Stellglied STG, wie es im Blockschaltbild (Abb. 32) dargestellt ist.

Im Vergleich wird der Sollwert-Istwert-Vergleich durchgeführt. Der Sollwert w ist im Abschnitt 5.1.1. mit $w = 0$ angegeben. Der Istwert ist durch die Spannungen U_3 bzw. nach Vorzeichenumkehrung durch die Spannung U_4 gegeben.

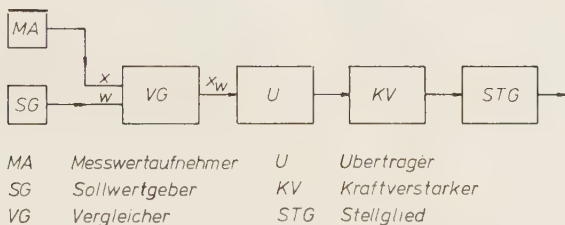


Abb. 32 Blockschaltbild des Reglers

Der Kraftverstärker liefert die zur Verstellung des Stellgliedes nötige Leistung. Durch Einschaltung von Übertragern mit einstellbarem Zeitverhalten kann eine Anpassung der Zeitkonstanten von Regler und Regelstrecke vorgenommen werden.

5.2.2. BESCHREIBUNG DER EINZELGRUPPEN

5.2.2.1. Vergleich und Kraftverstärker

Die Eingangstransistoren T_1 , T_5 des Kraftverstärkers (Abb.33) führen den Sollwert-Istwert-Vergleich durch. Die Spannung $w = 0$ V liegt am Emittor der beiden Transistoren T_1 und T_5 . Der Istwert liegt an der Basis. Die Schaltung spricht erst bei Spannungen von etwa 0,5 V an, da die Eingangstransistoren erst bei diesen Spannungen aufgesteuert werden.

Die Schaltung des Kraftverstärkers (Abb.33) ist im Prinzip eine Brückenschaltung von vier Leistungstransistoren T_3 , T_4 , T_7 und T_8 . T_3 und T_4 werden durch eine Ansteuerstufe T_1 , T_2 bei negativer Spannung am Eingang E geöffnet. Entsprechend bilden die Transistoren T_5 , T_6 die Ansteuerstufe für die Leistungstransistoren T_7 , T_8 bei positiver Eingangsspannung. Die Polarität der Spannung an der Last L hängt von dem Vorzeichen der Eingangsspannung ab. Die Zenerdioden ZG 5,6/1 und ZG 5,6/2 reduzieren die Spannung an der Last von 12 V auf 6 V.

Die Schaltung ist unter Berücksichtigung der erforderlichen Ausgangsleistung und der Daten der Leistungstransistoren ausgelegt.

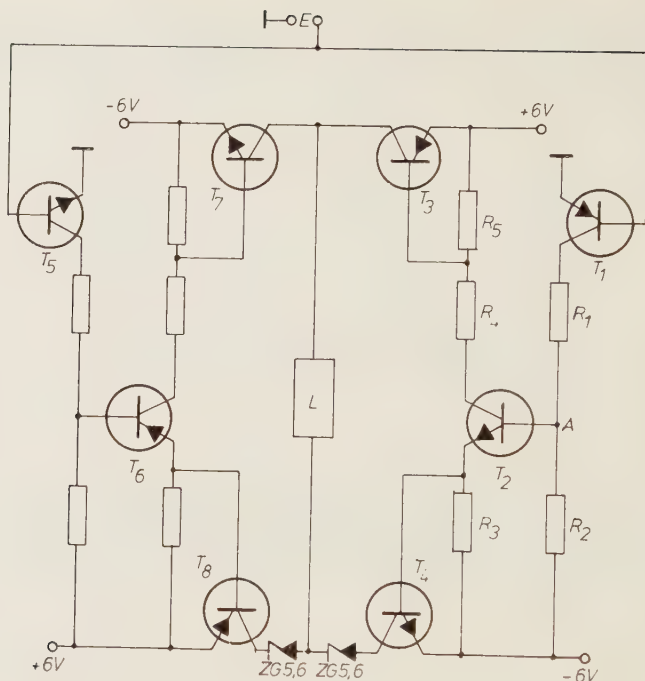


Abb. 33 Kraftverstärker

5.2.2.2. Stellglied

Das beim Versuchsaufbau verwendete Stellglied ist eine vom Haus SCHNEIDER serienmäßig hergestellte Antriebseinheit zur Entfernung- und Blendeneinstellung von Vidikon-Objektiven. Der Antriebsmotor vom Typ GK 16 stammt von der Firma Dunker.

5.3. Regelkreis

Im Blockschaltbild des Regelkreises (Abb. 34) ist die gesamte Anordnung zur Messung der Gradientendifferenz einschließlich der Torschaltung zu einem Block, dem sog. Differentialmeßwertaufnehmer DMA zusammengefaßt.

Die beiden Teilprozesse der optischen Abbildung sind durch den Block OA gekennzeichnet. Das RC-Glied wird zur Regelstrecke hinzugenommen.

Der Regler besteht aus Kraftverstärker KV (mit Vergleich) und Stellglied STG.

Der Zusammenhang zwischen Änderungen der Gegenstandsweite (Störgröße z) und der Stellgröße y ist durch den Block A dargestellt.

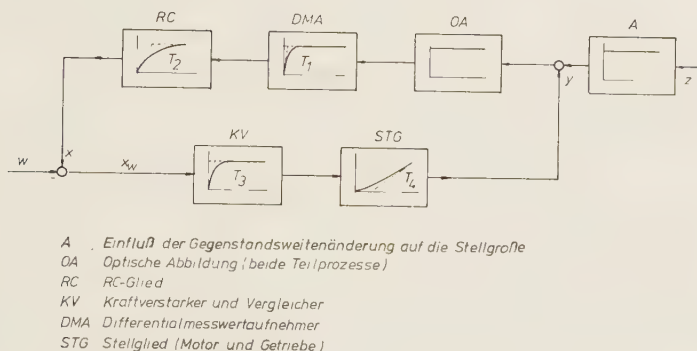


Abb. 34 Blockschaltbild des Regelkreises

In die Blöcke ist die Übertragungsfunktion der einzelnen Glieder bei sprunghafter Änderung der Eingangsgröße eingetragen.

Der optische Abbildungsprozeß weist ein reines Proportionalverhalten auf. Die Zeitkonstanten von Differentialmeßwertaufnehmer und Kraftverstärker sind im Vergleich zu denen von RC-Glied und Stellglied vernachlässigbar klein.

5.3.1. DIFFERENTIALGLEICHUNG DES REGELKREISES

Die Differentialgleichung der Regelstrecke lautet:

$$T_2 \cdot x' + x = V_1 \cdot y \quad (19)$$

Das Verhalten des Reglers ist bestimmt durch die Zeitkonstante des Stellgliedes. Motor und Getriebe bilden einen verzögerten Integralregler mit der Differentialgleichung:

$$T_4 \cdot y' + y = r_1 \int x dt \quad (20)$$

Die Kopplungsbedingung von Regelstrecke und Regler ist:

$$y_S = -y_R \quad (21)$$

Die Kombination der Gleichungen (19) und (20) liefert unter Berücksichtigung der Kopplungsbedingung (21) die Differentialgleichung des Regelkreises:

$$T_4 T_2 x''' + V_1 + (T_2 + T_4) x'' + V_1 x' + V_1 + r_1 x = 0 \quad (22)$$

Der Regelkreis ist nur bei geeigneter Wahl der Beiwerte T_2 , T_4 , V_1 und r_1 stabil.

- 46 Die Spannung U_4 am Operationsverstärker OP der Torschaltung als Regelgröße darf nach dem Nulldurchgang nicht über den in Abschnitt 5.2.2.1. angegebenen Schwellenwert von 0,5 V ansteigen. Unter dieser Bedingung tritt kein Überspringen ein.

Die der Regelabweichung von 0,5 V entsprechende Fehleinstellung des optischen Systems kann durch die Wahl der Gesamtverstärkung so klein gehalten werden, daß sie innerhalb des Schärftiefenbereiches liegt.

5.3.2. BESTIMMUNG DER BEIWERTE

V_1 ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Regelgröße x und Stellgröße y . Er hat die Dimension V/mm .

Für die Regelstrecke stellt Abb. 37 in Abschnitt 5.6. den Verlauf der Regelgröße x in Abhängigkeit von der Stellgröße y dar. Der Beiwert V_1 ist durch die Steigung im Nullpunkt bestimmt. V_1 ist abhängig von der Spannung U_1 bzw. U_2 . Es ist:

$$V_1 = 60 \text{ V/mm} \quad \text{bei} \quad U_1, U_2 = 4 \text{ V}$$

$$V_1 = 112 \text{ V/mm} \quad \text{bei} \quad U_1, U_2 = 9 \text{ V.}$$

Bei diesen Werten ist der Verstärkungsfaktor $A_3 = 10$ des Differenzverstärkers D3 berücksichtigt.

Die Messung erfolgte bei Verschiebung des Abtastelementes in Richtung der optischen Achse. Die Objektentfernung betrug etwa 1,5 m. Der Unterschied gegenüber einer Messung bei Verschiebung des Objektes ist vernachlässigbar. Der Motor des Stellgliedes treibt über verschiedene Getriebe die Verstell-einrichtung des Objektivs an. Die Zeitkonstante T_4 bestimmt das Ein- und Ausschaltverhalten des Stellgliedes.

Die induzierte Gegenspannung am Motor ist proportional zur Drehzahl. Die Stromaufnahme charakterisiert daher den Drehzahlverlauf. Beim Ein- und Ausschaltvorgang tritt ein Exponentialverhalten auf. Die Zeitkonstante T_4 kann aus der Anfangssteigung der Exponentialkurven ermittelt werden. Sie hat für beide Vorgänge einen Wert von $T_4 = 0,1 \text{ sec}$.

Der Beiwert $r_{.1}$ hat die Dimension $mm/Vsec$. Er gibt die Geschwindigkeit der Objektverschiebung pro Volt Eingangsspannung an.

Die Messungen bei verschiedenen Eingangsspannungen am Motor des Stellgliedes ergaben für die Verschiebegeschwindigkeit einen Mittelwert von $r_{.1} = 0,02 \text{ mm/Vsec}$.

Die Spannung am Kraftverstärker erreicht den Maximalwert von 6 V bei einer Eingangsspannung von 0,6 bis 0,7 V. Die mittlere Verstärkung ist also etwa 10. Mit diesem Faktor ist der obige Meßwert zu multiplizieren. Damit wird der Beiwert $r_{.1}$ in der Differentialgleichung (22) des Regelkreises:

$$r_{.1} = 0,2 \text{ mm/Vsec.}$$

Von den verschiedenen Stabilitätskriterien [48], [49] wird das von Nyquist für die Berechnungen herangezogen.

Für den Frequenzgang des offenen Regelkreises gilt:

$$F_0 = -F_R \cdot F_S$$

wobei F_R bzw. F_S der Frequenzgang des Reglers bzw. der Strecke ist.

Der Frequenzgang ist der Quotient aus Ausgangs- und Eingangsgröße bei sinusförmigem Eingangssignal. Der Schnittpunkt der Ortskurve mit der reellen Achse bestimmt das Stabilitätsverhalten des Regelkreises:

$$\begin{aligned} | \operatorname{Re}(F_0) | < 1 & \text{ Stabilität} \\ | \operatorname{Re}(F_0) | = 1 & \text{ Stabilitätsgrenze} \\ | \operatorname{Re}(F_0) | > 1 & \text{ Instabilität} \end{aligned}$$

Die erste Bedingung besagt, daß die Ausgangsamplitude bei einer bestimmten Frequenz kleiner ist als die Eingangsamplitude. Beim Zusammenschalten entsteht daher eine abklingende Schwingung.

Die Eingangsspannung am Kraftverstärker schwankt zwischen $-0,7$ und $+0,7$ V, da die Basis-Emitter-Spannung anliegt. Diese Werte legen die wirk-same Eingangsamplitude fest. Der Einstellvorgang muß nun so erfolgen, daß das Überspringen der Regelgröße x (Spannung U_4) kleiner ist als die Ansprechschwelle des Kraftverstärkers von $0,5$ V. Also muß

$$F_0 = 0,5 / 0,7 = 0,71 \quad (23)$$

sein.

Der Frequenzgang für Strecke und Regler ist durch folgende Gleichungen gegeben:

$$\begin{aligned} F_S &= V_1 / (1 + T_2 p) \\ F_R &= r_1 / (p (1 + T_4 p)) \end{aligned}$$

Dabei ist $p = i \cdot \omega$.

Einsetzen und Ausmultiplizieren unter Berücksichtigung der Bedingung (23) liefert:

$$V_1 r_1 + 0,71 i \omega (1 + i \omega T_2) (1 + i \omega T_4) = 0$$

Real- und Imaginärteil müssen gleich Null sein. Nach Eliminierung von ω folgt als Beziehung zwischen den einzelnen Beiwerten:

$$T_2 = 0,71 T_4 / (T_4 V_1 r_1 - 0,71)$$

Mit den Werten $T_4 = 0,1$ sec, $r_1 = 0,2$ mm/Vsec und $V_1 = 112$ V/mm wird $T_2 = 0,046$ sec. Bei $V_1 = 50$ V/mm ist $T_2 = 0,245$ sec. Für die Zeitkonstante T_2 des RC-Gliedes wird ein Wert von $0,1$ sec gewählt.

5. 4. Spannungsversorgung

Die Betriebsspannungen für die Vorverstärker und die Differenzverstärkerstufe sind $\pm 15\text{ V}$, die für Torschaltung und Kraftverstärker $\pm 6\text{ V}$.

Die Schaltungen der Netzteile (Abb. 35) sind prinzipiell gleich. Die 15 V -Netzteile sind für einen Maximalstrom von 400 mA ausgelegt. Die Strombe-

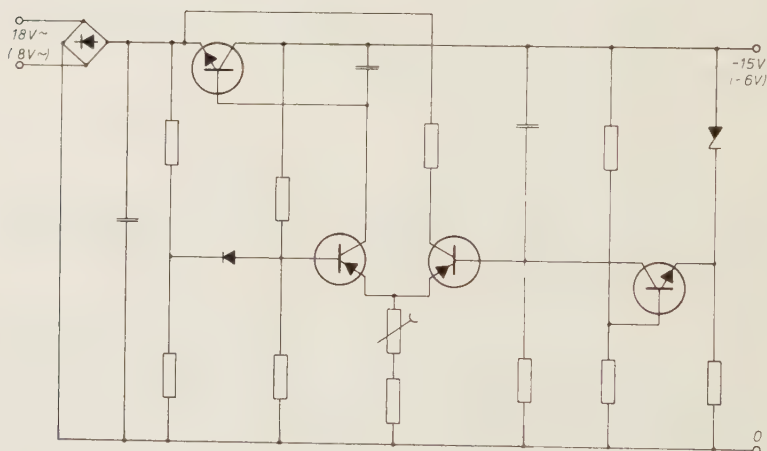


Abb. 35 Schaltung der Netzteile

grenzung ist einstellbar. Der Restbrumm bei Vollast ist $0,5\text{ mV}$, die Stabilität ist besser als $0,1\text{ Prozent}$.

Die entsprechenden Daten für das 6 V -Netzteil sind:

Maximalstrom: $1,0\text{ A}$

Restbrumm: $1,1\text{ mV}$

Stabilisierung: $< 1\text{ Prozent}$

5. 5. Technische Ausführung

Die faseroptischen Querschnittswandler werden unter dem Mikroskop auf die Endflächen des Strahlenteilers gekittet. Der Abstand der beiden Faserbündel an der Austrittsfläche beträgt $2,5\text{ mm}$. Die Photodioden (Durchmesser $1,5\text{ mm}$, Länge $2,5\text{ mm}$) sind in einem Kunststoffbauteil in einem Abstand von ebenfalls $2,5\text{ mm}$ angeordnet. Als Stromzuführungen dienen Kupferlackdrähte

mit einem Durchmesser von 0,25 mm. Das Kunststoffbauteil mit den beiden Photodioden ist in eine Messinghülse eingeführt, die über die Faserköpfe geschoben und justiert werden kann.

Der Abstand der beiden Abtastebenen beträgt etwa 0,4 mm, wie Abb. 36 in Abschnitt 5. 6. zeigt.

Die elektronischen Baugruppen sind als gedruckte Schaltungen ausgeführt. Zur Abschirmung äußerer Felder ist der Differentialmeßwertaufnehmer (ohne Torschaltung) in einem dreiteiligen Aluminiumgehäuse angeordnet. Der elektrische Kontakt zwischen den einzelnen Teilen wird durch Steckverbindungen hergestellt.

Das Gehäuse hat die Abmessungen $90 \cdot 60 \cdot 50 \text{ mm}^3$. Die Anschlüsse für die Spannungsversorgung und die Signalleitungen sind über einen Sechspolstecker nach außen geführt. Das Licht tritt durch eine kleine Öffnung am vorderen Teil des Gehäuses ein. Die Gleichspannungspegel und die Spannungsverstärkung der Vorverstärker können durch Potentiometer, die durch kleine Öffnungen in der Außenwand des Vorverstärkergehäuses erreichbar sind, eingestellt werden.

Netzteile, Torschaltung und Kraftverstärker sind als Steckkarten ausgeführt, die zusammen mit dem Transformator in einem zweiten Gehäuse untergebracht sind. Die Spannung für den Stellmotor kann über einen Stecker an der Vorderfront des Gehäuses abgenommen werden.

5. 6. Justierung und Funktionsprüfung

Zur Justierung werden bei Dunkelheit die Ausgangsspannungen der Differenzverstärker D1, D2 und D3 auf Null eingestellt. Bei Abbildung einer gleichmäßig leuchtenden Fläche muß diese Einstellung erhalten bleiben. Dies kann durch geeignete Wahl der Vorverstärkung erreicht werden.

Die Maximalwerte der Spannungen U_1 und U_2 müssen bei Abbildung einer Kante gleich sein. Bei der Einstellung wird gleichzeitig die Verstärkung zweier zusammengehöriger Kanäle verändert. Die Spannung U_3 wird Null, wenn die Bildebene symmetrisch zu den beiden Abtastebenen liegt.

Für die Funktionsprüfung wird als Objekt eine einfache Schwarz-Weiß-Kante gewählt. Eine beleuchtete Mattscheibe wird zum Teil durch zwei Metallfolien abgedeckt, so daß zwei Kanten mit Gradienten verschiedenen Vorzeichens entstehen. Die Leuchtdichte des Objektes wird durch Veränderung der Lampenspannung variiert. Da die Farbtemperatur des Strahlers dadurch geändert wird, kann die Wirksamkeit des Filters geprüft werden. Die Emp-

50 findlichkeitsänderung der Kanäle mit der Farbtemperatur ist äußerst gering und hat praktisch keinen Einfluß auf die Einstellgenauigkeit.

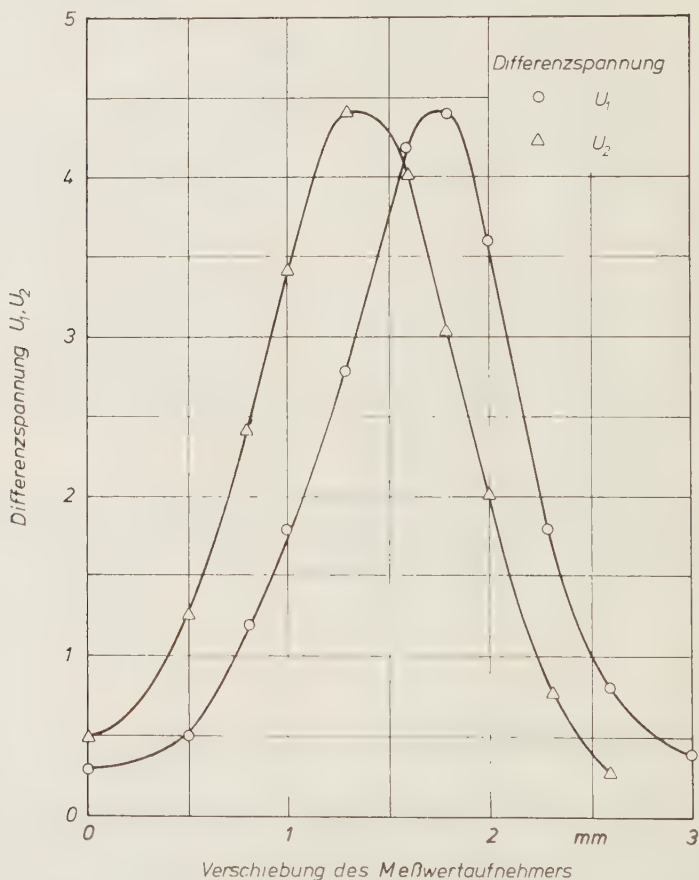


Abb. 36 Ausgangsspannungen U_1 , U_2 an den Differenzverstärkern D1, D2 in Abhängigkeit von der Bildebenenlage

Den Verlauf der Spannungen U_1 und U_2 bzw. U_3 in Abhängigkeit von der Lage des Meßwertaufnehmers zeigen die Abb. 36 bzw. 37.

Die Steigung des Spannungsverlaufes U_3 im Nullpunkt beträgt etwa 6 V/mm . Daraus folgt durch Multiplikation mit der Spannungsverstärkung $A_3 = 10$ des Differenzverstärkers D3 der Beiwert V_1 in Abschnitt 5.3.2..

Der Verlauf der Spannungen U_1 und U_2 bei Abtastung senkrecht zur Kante bei fast optimaler Einstellung ist in Abb. 38 dargestellt. Durch ungleichmäßige

Ausleuchtung der Mattscheibe sind die Spannungen im Bereich zwischen den beiden Maxima von Null verschieden.

51

Die Regelung setzt bei einer Verschiebung des Objektes um ± 1 cm bei einer Objektentfernung von 50 cm ein. Dies entspricht einer Bildweitenänderung um $\pm 16 \mu\text{m}$. Dieser Wert liegt innerhalb des Schärfentiefebereiches bei voller Öffnung des optischen Systems (vgl. Tab. 3 in Abschnitt 5. 1. 2. 1.).

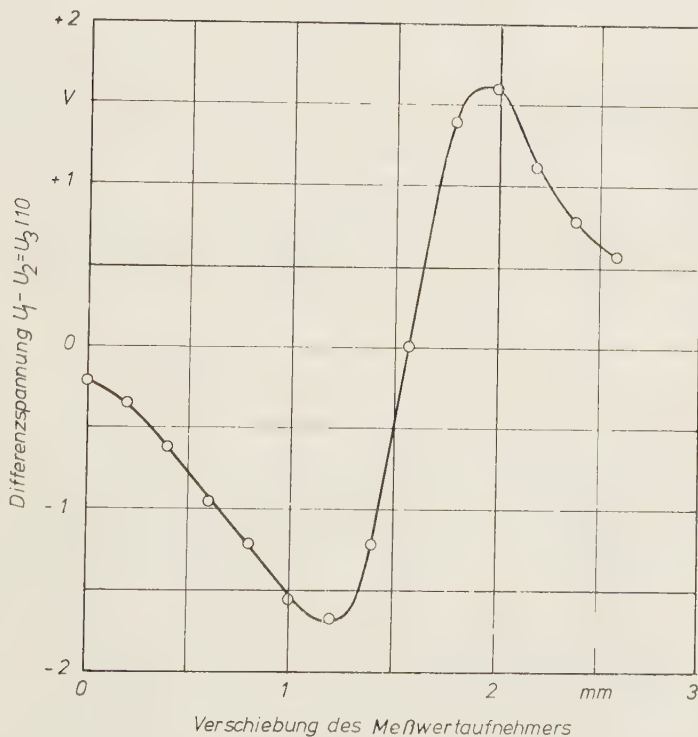


Abb. 37 Ausgangsspannungen U_3 an dem Differenzverstärker D3 in Abhängigkeit von der Bildebenenlage

Die absolute Empfindlichkeit S_1, S_2 , bezogen auf den Ausgang der Differenzverstärker D1, D2, beträgt bei einer Gesamtspannungsverstärkung $A_1 = A_2 = 500$ und einem Diodenlastwiderstand von $44 \text{ M}\Omega$ unter Berücksichtigung der Kanalempfindlichkeit S (Gleichung (12) in Abschnitt 5. 1. 2. 4.):

$$S_{1,2} = S \cdot A'_{1,2} \cdot R_L = 1,65 \cdot 10^{-11} \text{ A} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot 500 \cdot 4,4 \cdot 10^7 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1} = 3,63 \cdot 10^{-1} \text{ V} \cdot \text{lx}^{-1}$$



Abb. 38 Ausgangsspannungen U_1 , U_2 an den Differenzverstärkern D1 und D2 bei Abtastung senkrecht zur Kante und nahezu optimaler Einstellung

Die differentielle Empfindlichkeit S_3 , bezogen auf den Ausgang des Verstärkers D3 folgt daraus durch Multiplikation mit der Spannungsverstärkung $A_3 = 10$ zu:

$$S_3 = 3,63 \text{ V} \cdot \text{lx}^{-1}$$

Diese Werte gelten für Strahlertemperaturen über 2500°K .

Die Anpassungsschwierigkeiten zwischen faseroptischen Querschnittswandlern und Photodioden können bei Einsatz von integrierten Bauelementen mit definierter lichtempfindlicher Fläche vermieden werden. Die Konstruktion einer Doppeldiode mit Abmessungen der lichtempfindlichen Flächen, die den in Abschnitt 4.2. angegebenen Optimalwerten entsprechen, ist grundsätzlich möglich.

Strahlenteiler und zwei Doppeldioden können zu einem Bauelement zusammengefaßt werden.

Eine Miniaturisierung der Vorverstärker, der Differenzverstärkerstufe, der Torschaltung und des Kraftverstärkers durch weitergehende Integration ist denkbar.

Bei Einsatz von Batterien fallen Transformator und Netzteile weg.

Die Gesamtabmessungen des Gerätes können damit auf eine für die praktische Anwendung brauchbare Größenordnung reduziert werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Ein Verfahren zur vollautomatischen Scharfeinstellung optischer Systeme wird beschrieben, bei dem als Einstellkriterium die maximale Steilheit des Kantenbildes benutzt wird. Die Steilheit wird durch die Differenz der Lichtströme in zwei Flächenelementen mit gemeinsamer Trennungslinie bestimmt. Zur Festlegung der Defokussierungsrichtung wird eine Abtastung in zwei Ebenen vorgenommen. Dadurch wird gleichzeitig der Einfluß von Objektbewegungen in der Gegenstandsebene und von Leuchtdichteschwankungen eliminiert.

Auf Grund von Messungen der optischen Übertragungsfunktion, der Linienbild- und Kantenbildfunktion sind Optimalwerte für die Spaltdimensionen und den Abstand der Abtastebenen ermittelt worden. Gleichzeitig ist die Empfindlichkeit photoelektrischer Wandler bei der Optimierung berücksichtigt.

Beim Modellaufbau ist das Doppelspaltsystem durch einen faseroptischen Querschnittswandler verwirklicht worden. Die Aufspaltung des Strahlenganges zur Abtastung in zwei identischen Bildausschnitten zweier Ebenen wird durch einen Strahlenteiler erreicht.

Die Einzelelemente von Regelstrecke und Regler werden beschrieben und die Stabilität des Regelkreises untersucht.

- | | | | |
|------|---|---|------------------------------|
| [1] | R. GENÄHR | DBP Nr. 1279374 | 22. 01. 1966 |
| [2] | F. HODAM | Feingerätetechnik 3 (1954) 437 und 471
Feingerätetechnik 4 (1955) 61 und 211 | |
| [3] | W. REICHEL | DBP Nr. 864084 | 1. 11. 1949 |
| [4] | K. HILDEBRAND | DAS Nr. 1217632 | 16. 01. 1959 |
| [5] | (Paillard) | OPa A 789 / 67 | 27. 01. 1967 |
| [6] | J. DURST, L. U. H. OBERRAUCH | SzP Nr. 387442 | 25. 08. 1961 |
| [7] | M. M. J. SHULJMAN | FP Nr. 1402665 | 31. 07. 1964 |
| [8] | D. R. CRAIG | DAS Nr. 1173327 | 9. 04. 1962 |
| [9] | (Paillard) | OP Nr. 240694 | 26. 07. 1963 |
| [10] | H. E. KALLMANN | Elektronik Nr. 1 (1957) | |
| [11] | (American Transportation Corporation) | EP Nr. 1129542 | 1. 03. 1965 |
| [12] | F. FAULHABER | DBP Nr. 1087372 | 4. 09. 1954 |
| [13] | G. FAUTH u. a. | DAS Nr. 1197316 | 21. 06. 1963 |
| [14] | G. FAUTH u. a. | DBP Nr. 1210672 | 21. 12. 1963 |
| [15] | F. JAKOB, J. SPATZ | AP Nr. 3270647 | 10. 06. 1964 |
| [16] | Deutscher Normenausschuß
Fachnormenausschuß:
Lichttechnik | DIN 5031 Blatt 1 . . . 4 | |
| [17] | W. WEIZEL | Lehrbuch der Theoretischen Physik
Band I Seite 760 ff.
Berlin-Göttingen-Heidelberg 1963 | |
| [18] | H. GEIGER, K. SCHEEL | Handbuch der Physik
Band 19 (1928) 40 | |
| [19] | H. NYQUIST | Phys. Rev. | 32 (1928) 110 |
| [20] | C. J. BAKKER, G. HELLER | Physica | 3 (1939) 262 |
| [21] | K. W. BÖER | Ann. Phys. | 14 (1954) 87
15 (1955) 55 |
| [22] | G. G. MACFARLANE | Proc. Phys. Soc. | 59 (1947) 366 |

- [23] H. MEINKE, F. W. GUNDLACH Taschenbuch der Hochfrequenztechnik
Berlin (Springer) 1962
- [24] H. H. HOPKINS Proc. Phys. Soc. B 70 (1957) 1002
- [25] A. LOHMANN Habilitationsschrift Braunschweig 1957
- [26] W. H. STEEL JOSA 47 (1957) 405
- [27] M. HERZBERGER JOSA 37 (1947) 485
- [28] H. WASMUND Diplomarbeit
A. BIGELMAIER, K. D. SCHÄFER,
H. WASMUND Optik 26 (1967) 465
- [29] Deutscher Normenausschuß Literatursammlung:
Fachnormenausschuß: Rechnerische Untersuchung der
Feinmechanik und Optik Abbildungsgüte
Arbeitskreis: Qualitäts- Literatursammlung:
bewertung optischer Systeme Meßgeräte zur Messung der optischen
Übertragungsfunktion
- [30] H. SLEVOGT Optik 18 (1961) 506
- [31] K. STREHL Zeitschrift für Instrumentenkunde
22 (1902) 213
- [32] J. HERTEL Mitteilungen und Berichte
Optisches Institut der Technischen
Universität Berlin Heft 7 (1963)
- [33] O. H. SCHADE National Bureau of Standards Circular
526 (1954) 275
- [34] G. C. HIGGINS, L. A. JONES JSMPTE 58 (1952) 277
G. C. HIGGINS, R. N. WOLFE JOSA 45 (1955) 121
- [35] J. HARTMANN Physikalische Verhandlungen
7 (1956) 144
- [36] J. KÄMMERER Mitteilungen und Berichte
Optisches Institut der Technischen
Universität Berlin Heft 6 (1960)
- [37] W. KROEBEL Optik 18 (1961) 471
- [38] E. LINFOOT Qualitätsbewertung optischer Bilder
Braunschweig 1960
- [39] R. HAUSER u. a. Optik und Spektroskopie aller
Wellenlängen
Akademie-Verlag (1962) 249
- [40] G. BARNSTEDT Optik 18 (1961) 499
- [41] W. LUKOSZ Optik 14 (1957) 490

- 56 [42] E. HEYNACHER Zeiss-Mitteilungen 3 (1963) 32
- [43] K. BIEDERMANN Dissertation 1965
Institut für Wissenschaftliche
Photographie München
Institutsbericht Nr. 32
- [44] H. H. HOPKINS Proc. Phys. Soc. B 70 (1957) 449
- [45] G. FRANKE Optica Acta 6 (1959) 308
- [46] G. FRANKE Photographische Optik
Akademische Verlagsgesellschaft
Frankfurt/Main 1964
- [47] L. POLLAK Faseroptik
Informationsschrift der Firma
Josef Schneider, Bad Kreuznach 1969
- [48] W. OPPELT Kleines Handbuch technischer
Regelvorgänge
Verlag Chemie Weinheim 1967
- [49] G. PRESSLER Regelungstechnik
Bibliographisches Institut
Mannheim 1964

Diese Arbeit wurde im Hause JOS. SCHNEIDER & CO.,
Optische Werke, Bad Kreuznach, durchgeführt.

Frau Senator Grete Schneider, Herrn Hans Joseph Schneider und der Geschäftsleitung danke ich für großzügige Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. G. Franke, Wetzlar, und Herrn Prof. Dr. E. Saur, Gießen, danke ich sehr herzlich für Ihr förderndes Interesse.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. H. Klarmann im Hause Schneider für die Überlassung des Themas und fruchtbare Diskussionen.

Schließlich danke ich auch den Mitarbeitern des Hauses Schneider, die diese Arbeit durch Überlassung von Laborgeräten und mechanische und photographische Hilfeleistungen unterstützt haben.

LEBENS LAUF

17. 12. 1940 geboren in Eiershausen/Dillkreis
als zweiter Sohn des Bergmannes Rudolf Kunz
und seiner Frau Lydia geb. Neef
- Herbst 1946 Einschulung (Volksschule Eiershausen)
- Ostern 1951 Übertritt in das Gymnasium in Dillenburg
3. 03. 1960 Abitur
1. 05. 1960 Beginn des Physikstudiums
an der Universität Gießen
1. 10. – 23. 10. 1962 Diplom-Vorprüfung in Physik
2. 11. – 8. 11. 1965 Diplom-Hauptprüfung in Physik
1. 02. 1966 Eintritt in die Firma Josef Schneider,
Optische Werke, Bad Kreuznach
Dissertation über ein Verfahren zur
vollautomatischen Scharfeinstellung
optischer Systeme

WILFRIED KUNZ

Bad Kreuznach, den 24. 12. 1969

